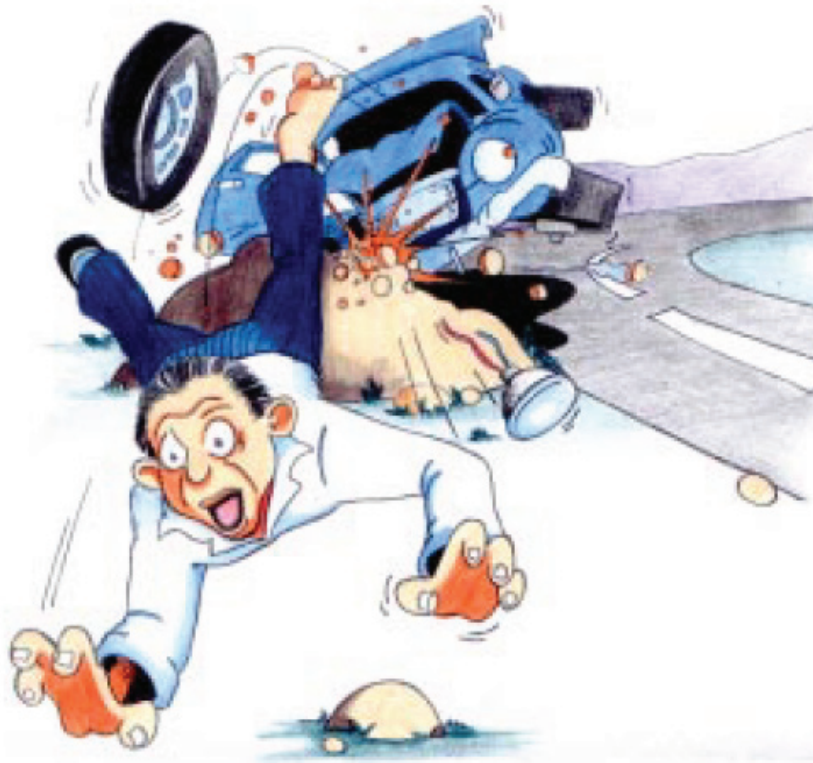


FÍSICA

Tercer Año de Bachillerato

JÚPITER FIGUERA



Primera Ley de Newton

Publtext

The Textbook Company



Agradecimientos

Debo reconocer la conjunción de esfuerzos que me ayudaron a darle forma a esta obra. Las siguientes personas se esforzaron para perfeccionar este instrumento de estudio:

Prof. Carlos Lezama
Prof. Oscar Díaz
Prof. Daniel Romero
Prof. Luis Araque Lamedada
Prof. Vilma Velásquez
Br. Emilio Gómez
Br. Ernesto Figuera
Br. Katuska Velásquez

El Prof. Lezama tuvo a cargo la ardua tarea de revisar cuidadosamente los originales del libro y sus valiosas sugerencias fueron plasmadas en la versión final. El Prof. Luis Araque Lamedada, del Dpto. de Física de la Universidad de Oriente, hizo importantes observaciones en la parte conceptual. A la Prof. Vilma Velásquez debo agradecer la revisión de las respuestas a los problemas planteados en el libro.

Asimismo, tengo que mencionar a la Sra. Anamary Vázquez, transcriptor de todos los capítulos del libro y a mi esposa, Isabel Figuera, quien intervino en la corrección de mis notas.

Dedicatoria

Celeste: es cierto que los besitos curan y no tienen espinas.
Con tu presencia has fabricado un dulce camino.

A mi madre, quien con sus rezos moldea constantemente la bondad.

A mis amigos de siempre.

Prefacio

Intentar escribir sobre la obra que uno mismo ha construido, implica profundas reflexiones. Este texto es también producto de las mismas. Perfeccionar un camino que tantas personas valiosas han trazado, es motivo para comenzar de nuevo. Por creer necesario devolver a nuestro país parte de la cuantiosa deuda intelectual que uno tiene con el mismo, decidí continuar con una labor de reversión, que comenzó con mis libros de Matemática y cuya continuación se plasma en este libro de Física para el noveno grado de la Educación Básica.

Se ha tratado de mantener, a lo largo del libro, una relación estrecha entre los distintos temas de Física y situaciones encontradas comúnmente, en el diario quehacer. Se pretende con esto entusiasmar al estudiante, con el fin de mantener dirigida su atención a una materia que, en muchas ocasiones, podría aparecer divorciada de lo que se aprecia en nuestra relación con el entorno.

El énfasis sobre los conceptos conforma la médula espinal de este trabajo. La reducción de los temas de Física a una simple formulación de los fenómenos, es una manera de alejar al estudiante del pensamiento profundo y creativo. Esto se quiso evitar en la presente obra, donde se enfatiza la parte conceptual, sin dejar de mencionar las relaciones matemáticas que gobiernan muchos fenómenos físicos. Espero haberlo logrado.

Prof. Júpiter Figuera Yibirín

Cumaná, abril 2016



Contenido

1 La Física: un Producto del Ingenio Humano

- 1.1 La Física como creación de la mente humana 1
- 1.2 El método científico. La conducta del científico 6
- 1.3 Impacto social de la ciencia y la tecnología 8

2 Las Mediciones en Física

- 2.1 Física Clásica y Física Moderna 12
- 2.2 Sistema internacional de medidas 15
- 2.3 Múltiplos y submúltiplos de las unidades fundamentales 20

3 Movimiento Rectilíneo

- 3.1 ¿Qué es el movimiento? 23
- 3.2 El movimiento es relativo 24
- 3.3 Rapidez. Rapidez instantánea y rapidez media 25
 - Rapidez instantánea* 26
 - Rapidez media. Rapidez uniforme* 26
 - Conversión de unidades de rapidez* 29
- 3.4 Velocidad. Velocidad media y velocidad instantánea 37
 - Escalaes y vectores* 38
 - Representación de vectores* 39
 - Trayectoria, distancia y desplazamiento* 41
 - Velocidad media* 42
 - Velocidad uniforme* 45
 - Velocidad instantánea* 50

4 Movimiento Rectilíneo. Gráficos.

- 4.1 Gráfico de distancia en función del tiempo 55
- 4.2 Gráfico de la velocidad en función del tiempo 65

5 Aceleración y Caída Libre

- 5.1 Aceleración 69
- 5.2 Aceleración instantánea y aceleración media 71
- 5.3 Aceleración uniforme 75
- 5.4 Gráficos en el movimiento rectilíneo uniformemente acelerado 83
- 5.5 Caída libre 91
- 5.6 Caída libre sin velocidad inicial 93
- 5.7 Lanzamiento vertical hacia abajo 98
- 5.8 Lanzamiento vertical hacia arriba 100

6 Primera Ley de Newton

- 6.1 El significado de fuerza 105
- 6.2 Un error que oscureció la Física por 2.000 años 108
- 6.3 Galileo echa por tierra la teoría aristotélica 109
- 6.4 Primera ley de Newton 111
- 6.5 Fuerzas balanceadas y no balanceadas 113
- 6.6 Inercia, masa y peso 114

7 Segunda Ley de Newton

7.1	La aceleración depende de la fuerza y de la masa	119
7.2	Segunda ley de Newton	121
7.3	El peso de un cuerpo y la segunda ley de Newton	124
7.4	La fuerza de fricción	127

8 Tercera Ley de Newton. Ley de la Gravitación Universal.

8.1	Interacciones. Fuerzas de acción y reacción	134
8.2	Tercera ley de Newton	136
8.3	Medición de la masa y de la fuerza	140
8.4	Fuerza de gravedad y aceleración de gravedad	141
8.5	La ley de la Gravitación Universal	142

9 Centro de Masa y Centro de Gravedad

9.1	Centro de masa	148
9.2	Centro de gravedad	150
9.3	¿Coincide el centro de masa con el centro de gravedad?	150
9.4	Determinación del centro de gravedad	153

10 Momento de Torsión. Equilibrio.

10.1	Momento de torsión de una fuerza	165
10.2	Composición y descomposición de fuerzas	171
10.3	Equilibrio mecánico	180
10.4	Estados de equilibrio	188
10.5	Estabilidad	190
10.6	Volcamiento	192

11 Trabajo y Energía

11.1	Trabajo	194
11.2	Energía	198
11.3	Conservación de la energía	201
11.4	Energía cinética	202
11.5	Energía potencial	204

11 Temperatura y Calor

12.1	Temperatura y energía	212
12.2	Temperatura y calor	213
12.3	Medición de la temperatura	216
12.4	Expansión térmica	220
12.5	Expansión del agua	224
12.6	Medida del calor	227
12.7	Transferencia de calor	229
12.8	Calor específico	235
12.9	Estados de agregación de la materia. Cambio de fases.	243

12 Naturaleza de las Ondas

13.1	¿Qué es una onda?	251
13.2	Ondas transversales, longitudinales y de superficie	254
13.3	Características de una onda	256
13.4	Frecuencia y período de una onda	261
13.5	Rapidez de propagación de una onda	264
13.6	Reflexión de una onda	269
13.7	Refracción de una onda	271
13.8	Difracción de una onda	272
13.9	Superposición e interferencia de ondas	273
13.10	Ondas estacionarias	274

14 El Sonido

14.1	Naturaleza del sonido	277
14.2	Frecuencia y tono	280
14.3	Intensidad del sonido. El decibel	282
14.4	Timbre de un sonido	288
14.5	Rapidez del sonido	289
14.6	El oído humano y la audición	291
14.7	Interferencias y batidos	293
14.8	Efecto doppler y ondas de choque	297
14.9	Reflexión, refracción y difracción del sonido	298
14.10	Resonancia y ondas estacionarias	299

15 La Luz

15.1	¿Qué es la luz?	303
15.2	El espectro elctromagnético	306
15.3	La rapidez de la luz	308
15.4	Rayos de luz	308
15.5	Reflexión de la luz	309
15.6	Refracción de la luz	311
15.7	Fenómenos visuales asociados con la refracción de la luz	314

16 Espejos y Lentes

16.1	Espejos planos	319
16.2	Espejos esféricos	324
16.3	Formación de imágenes en espejos esféricos	325
16.4	Aumentos en los espejos esféricos	330
16.5	Ecuación de los espejos esféricos	331
16.6	Las lentes esféricas	336
16.7	Formación de imágenes en las lentes	338
16.8	Instrumentos ópticos	341
1.6.9	El ojo humano y la visión	343

17 Fenómenos Eléctricos

17.1	Estructura atómica de la materia	346
17.2	Carga eléctrica. Electrización	347
17.3	Cuantización y conservación de la carga	350
17.4	Conductores y aislantes	351
17.5	Inducción electrostática	353
17.6	El electroscope	354
17.7	Ley de Coulomb	355
17.8	Campo eléctrico. Líneas de fuerza	362
17.9	Campo eléctrico debido a una carga puntual	365
17.10	Energía potencial eléctrica. Potencial eléctrico	367
17.11	Corriente eléctrica. Ley de Ohm	370
17.12	Circuitos eléctricos. Combinación de resistencias	372
	Bibliografía	379
	Respuestas a los problemas	380

CAPÍTULO 1



La Física: un Producto del Ingenio Humano

1.1 LA FÍSICA COMO CREACIÓN DE LA MENTE HUMANA

La Física, como actividad creativa del hombre, tiene gran semejanza con los procesos de creatividad que se dan en otros campos en los cuales la especie humana ha dejado huella imperecedera. Las grandes obras artísticas de la humanidad, las concepciones poéticas, el desarrollo del pensamiento lógico que tanto impulso ha dado a las computadoras, las avanzadas investigaciones en la genética, son sólo unos pocos ejemplos de la capacidad de abstracción de la especie humana, que le ha permitido crear un andamiaje científico para amoldar el mundo que le rodea a su concepción de la realidad. Así, ha creado modelos y teorías y descubierto leyes que le permiten tener una explicación de las cosas que detectan sus sentidos. El ordenamiento de lo que cotidianamente percibe, mediante relaciones inventadas por él mismo, satisface su permanente deseo por encontrar explicaciones al origen de los fenómenos que, en principio, desconoce.



La observación es el primer paso para la explicación de un fenómeno físico.

Ahora bien, es usual vincular muchos fenómenos naturales con la Física. Cuando hablamos de «movimiento», «gravedad», «temperatura», «energía nuclear» establecemos mentalmente un concepto intuitivo que nos lleva a identificarlos como *fenómenos físicos*. Es decir, el físico parte de la observación de esos eventos y, luego, trata de crear los modelos teóricos que los cuantifiquen. Llega, así, a la formulación de teorías que tratan de explicar, en los casos mencionados, el comportamiento de un cuerpo cuando se mueve, el por qué un objeto cae, la temperatura de un objeto en un momento dado, o por qué se produce una reacción nuclear. Aquí, entra a jugar un papel fundamental la imaginación, ya que el físico, ante la imposibilidad de tomar en cuenta todos los factores que inciden sobre la explicación del fenómeno, debe establecer cuáles realmente son relevantes para obtener una explicación que le satisfaga.

Es necesario destacar que en la Física las teorías se crean para explicar lo observado. Es decir, son el producto de la profundización del pensamiento humano en su constante búsqueda de las explicaciones de los hechos. No necesariamente las teorías son consecuencias de las observaciones directas de los elementos que dan lugar a los hechos. Así, por ejemplo, es un hecho evidente la presencia de la radio y la televisión en nuestros hogares. Jamás nadie ha visto una onda electromagnética, pero sabemos que la radio y la televisión funcionan. En este caso, la teoría electromagnética, uno de cuyos máximos exponentes fue el físico inglés James Clerk Maxwell, explica cómo se propagan esas ondas. Similarmente, nadie, hasta ahora, ha visto los átomos pero existe una teoría atómica que explica los fenómenos que ponen de manifiesto la existencia de los mismos. Los llamados agujeros negros, cuerpos estelares de enorme atracción gravitatoria, fueron sugeridos teóricamente a través de ecuaciones matemáticas. Esta teoría, desarrollada por astrofísicos, sirvió luego para explicar algunos de los fenómenos que tienen lugar en el espacio sideral. Los agujeros negros atrapan la luz en su interior y, hasta hoy, los científicos no han logrado verlos.

Aun cuando los procesos creativos de la Física son comparables a los que se dan en otras actividades de la cultura del hombre, hay una diferencia fundamental: *la Física, como otras ciencias, necesita probar los modelos y las teorías concebidas*. Para ello, hace uso de la *observación y de la experimentación*, con el fin de establecer la validez de sus argumentos. Esta labor no es tan sencilla, como muchas veces se piensa. En realidad, no es posible acer-

carse con total propiedad al fenómeno físico. Además, los instrumentos de medición no son perfectos y siempre dejan errores que abren el camino para que, posteriormente, surjan explicaciones nuevas más convincentes, las cuales, usualmente, cubren una mayor gama de variables dentro de los fenómenos observados. Un caso típico es el de la teoría de la relatividad de Einstein. Hasta principios del pasado siglo, el movimiento de los cuerpos era explicado de acuerdo con las teorías de Galileo y de Newton. Sin embargo, Einstein demostró que para velocidades muy altas, cercanas a la velocidad de la luz, esa teoría perdía su validez. Hubo, entonces, que hacer las modificaciones necesarias para crear una nueva teoría, *la teoría de la relatividad*, a fin de poder explicar lo que sucedía a esas velocidades.



Albert Einstein demostró que las teorías del movimiento de Galileo y de Newton, perdían su validez para velocidades cercanas a la de la luz.

En la fig. 1.1 se presenta un diagrama de flujo, como aproximación al proceso, que permite pasar desde la observación de un fenómeno físico a la concepción del modelo que lo explica. Cuando hablamos de modelo, nos estamos refiriendo, indistintamente, a una imagen mental del fenómeno o a una relación matemática que permite explicarlo cuantitativamente.

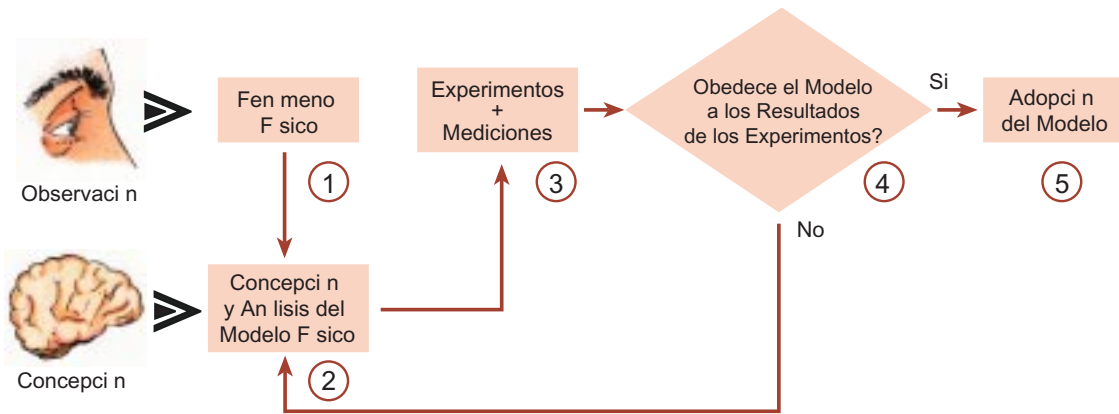


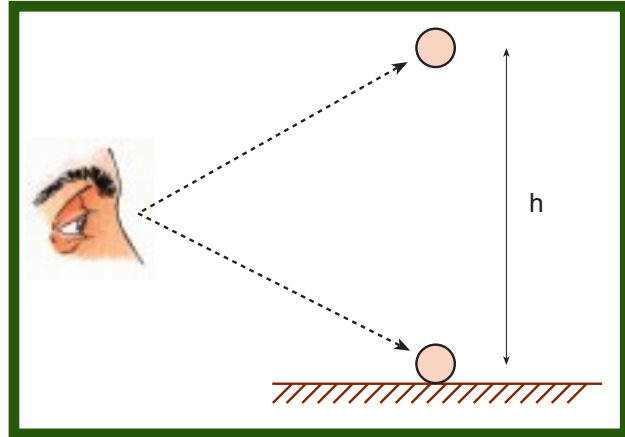
Fig. 1.1 Diagrama que explica cómo el ser humano concibe un modelo físico.

Como vemos en la figura, en la observación del fenómeno intervienen, en un principio, los sentidos (paso 1). Luego interviene el intelecto de la persona para formular el modelo que, como ya dijimos, puede incluir relaciones matemáticas (paso 2). El próximo paso (3) consiste en la realización de experimentos para corroborar la aproximación del mo-

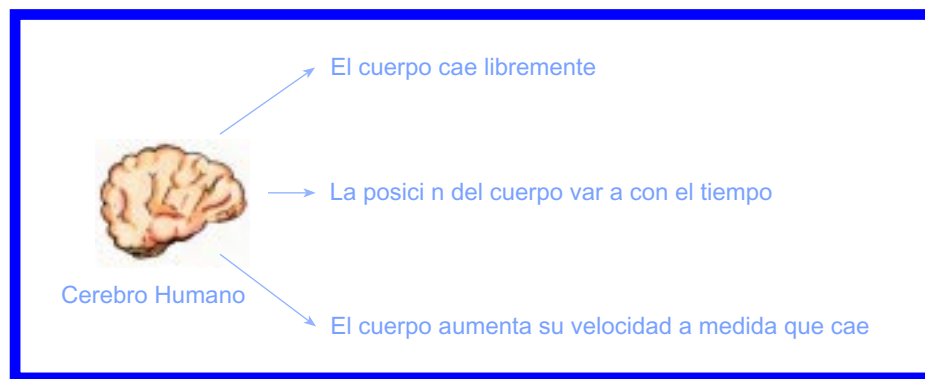
delo al fenómeno físico observado. De estas mediciones experimentales surge un modelo físico perfeccionado. Este último no necesariamente es definitivo y nuevas mediciones pueden dar origen a posteriores perfeccionamientos.

Tomemos como ejemplo un cuerpo que cae libremente desde cierta altura. Veamos cómo el esquema de la fig. 1.1 se puede utilizar en este caso:

1. Observación del fenómeno físico.



2. Intervención de la mente humana en la creación del modelo físico o matemático.



Para la creación del modelo se establece, por ejemplo, la relación entre la rapidez del cuerpo y el tiempo de caída. Se postula que podría tratarse de una relación lineal, tal como:

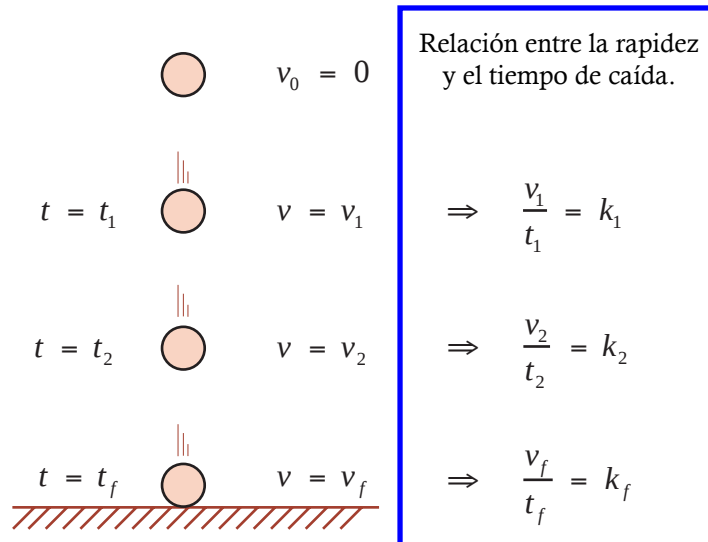
$$v = k t$$

(1.1)

La ecuación anterior es una relación lineal para la rapidez, v , del cuerpo, la cual es directamente proporcional al tiempo que tardó el objeto en caer. Corresponde, entonces, a una descripción matemática del fenómeno físico observado. Esta es sólo una de las otras

posibles relaciones que podrían conjeturarse.

3. Con el fin de comprobar la relación (1.1), se efectúan medidas de la rapidez a distintos tiempos de observación.



Si, efectuados los cálculos, se consigue que $k_1 = k_2 = k_f = k$, se puede llegar a la conclusión de que sí se cumple la relación lineal dada por:

$$\frac{v}{t} = k \quad \Rightarrow \quad v = kt \quad (1.2)$$

4. La experimentación anterior (paso 3) puede reafirmar la validez del modelo matemático y la relación $v = kt$ se convierte en una manera de explicar cómo varía la velocidad con el tiempo transcurrido.

5. Si surgieran dudas sobre la explicación del fenómeno físico mediante la citada relación, se procede al perfeccionamiento del modelo (paso 2). Por ejemplo, puede tomarse en cuenta la influencia del aire en retardar la caída del cuerpo. De allí se pasa a realizar nuevos experimentos (paso 3), en un proceso que podría repetirse hasta que se logre una explicación que satisfaga a la comunidad científica.

Es relevante hacer notar la intervención decisiva del ingenio humano en todas las etapas de la síntesis del modelo. Todo el pensamiento científico ha sido puesto al servicio de la creación de modelos y teorías, mediante las cuales se da una explicación a lo que la inquieta especie humana observa con permanente curiosidad.



PIENSA Y EXPLICA



- 1.1 ¿Qué es un fenómeno físico?
- 1.2 ¿Es la Física un producto de la imaginación del hombre?
- 1.3 ¿Qué es un agujero negro?
- 1.4 Investiga la vida del físico inglés James Clerk Maxwell y los aportes que hizo a la ciencia. Para ello, puedes hacer uso de las posibilidades de Internet.
- 1.5 ¿Qué entiendes por modelo en la ciencia?
- 1.6 ¿Cómo se perfecciona un modelo físico? Da ejemplos.
- 1.7 ¿Cuáles son los pasos que llevan a perfeccionar un modelo?
- 1.8 ¿Cuál es la importancia de la experimentación en la ciencia para la creación de un modelo?
- 1.9 ¿Cuándo debe modificarse un modelo científico?
- 1.10 ¿Están las teorías científicas sujetas a modificaciones?
- 1.11 Investiga la vida del físico alemán Albert Einstein y sus aportes a la ciencia. Usa Internet en lo posible.

1.2 EL MÉTODO CIENTÍFICO. LA CONDUCTA DEL CIENTÍFICO.

Muchos descubrimientos y avances científicos han sido producto de la casualidad y de resultados obtenidos mediante la experimentación, por ensayo y error. La curiosidad humana, el talento y la intuición han jugado y seguirán jugando un papel importante en el desarrollo de la ciencia. Sin embargo, los intentos por formalizar un procedimiento para justificar los modelos de las ciencias, han conducido al llamado método científico, del cual Galileo Galilei, científico italiano (1564-1642) y Francis Bacon, filósofo inglés (1561-1626), son considerados sus fundadores.

El método científico consta, esquemáticamente, de los siguientes pasos:

1. Identificación del problema.
2. Establecimiento de una hipótesis razonable; esto es, una presunción o conjetura que pueda explicar el problema.
3. Pronóstico de los resultados de la hipótesis.
4. Experimentación para verificar la hipótesis.
5. Creación de un modelo físico-matemático que armonice la hipótesis, el pronóstico y los resultados de los experimentos.

Sólo cuando una hipótesis ha sido probada experimentalmente, sin encontrar contradicciones durante numerosos intentos, ésta puede considerarse una ley física.



A Galileo Galilei, Isaac Newton y Francis Bacon se les considera los creadores del método científico.

La actitud de un científico debe ser de amplia libertad de pensamiento. Su posición ante las evidencias arrojadas por la experimentación debe ser de aceptación de los hechos, independientemente de si los mismos contradicen leyes anteriores o autoridades científicas reconocidas. Entonces, cualquier hipótesis o ley que, sometida a trabajo experimental, no muestre ser consistente con los resultados, debe ser modificada o abandonada.

Una explicación errada de un fenómeno físico lo tenemos en los argumentos del filósofo griego Aristóteles (384-322 a.c.), quien sostenía que los cuerpos en caída libre se desplazan a una velocidad proporcional a su peso. De esta forma, un lápiz y un pesado libro tardarían tiempos distintos en caer desde una misma altura. Este falso concepto se mantuvo vigente por más de 2.000 años, amparado en la enorme autoridad de Aristóteles.



La inmensa autoridad de Aristóteles hizo que, por más de 2.000 años, se creyera que cuerpos de diferentes masas caían libremente, desde una misma altura, con tiempos distintos.

Otro punto fuerte en la actitud científica es no dejarse arrastrar por lo que un científico desea ver u obtener, en contradicción con lo que los hechos muestran. En muchos casos, es evidente que cuando una idea ha tomado cuerpo en la comunidad científica, se presta más atención a los hechos o experimentos que la confirman respecto de aquellos que parecen refutarlos. De esta forma, se pierden, en muchos casos, oportunidades para lograr avances científicos importantes.

Una *teoría científica* es un cúmulo de información que reúne varias hipótesis probadas y referidas a un aspecto de las ciencias. Así, la teoría electromagnética aglutina varios aspectos de la propagación de las ondas electromagnéticas en distintos medios. Las teorías son, a menudo, objeto de revisión, modificación o reemplazo. En esta capacidad para producir cambios descansa la vitalidad de la ciencia. De allí la importancia de enfatizar la honestidad del científico en el trabajo realizado diariamente. Solo la búsqueda de la verdad, independientemente de las posiciones personales o de grupo, debe privar en el trabajo científico.

1.3 IMPACTO SOCIAL DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

A menudo, los vocablos «ciencia» y «tecnología» son utilizados como si fueran equivalentes. En términos más precisos, podemos afirmar que ambos términos son complementarios. La ciencia tiene como objetivo explicar hechos que la naturaleza presenta como interrogantes. Para cumplir con este objetivo, la ciencia investiga los fenómenos naturales, establece las relaciones que los gobiernan y precisa las teorías que los explican. La tecnología hace uso de los descubrimientos de la ciencia para utilizar los conocimientos generados, modificando, de esta forma, la calidad de vida de la población.

El mundo actual ha sido testigo del impacto social de la tecnología. Éste, muchas veces, genera modos de comportamiento que, de tanto repetirlos, se convierten en una conducta casi natural. ¿Quién se asombra al tener que detener su vehículo en una intersección controlada por un semáforo? ¿Por qué movilizarse hasta una sala de cine si podemos acostarnos cómodamente a ver televisión? Por otra parte, la tecnología es señalada con frecuencia como la causante del deterioro del medio ambiente, poniendo en peligro la existencia misma de la especie humana. Los desastres ecológicos causados por los derrames de petróleo, en ríos y en océanos, son ejemplos de los peligros implícitos en el desarrollo tecnológico.

Asimismo, el uso de insecticidas para mejorar las cosechas ha desencadenado desequilibrios ecológicos de importancia. Esas fallas se corrigen recurriendo nuevamente a la ciencia, como herramienta complementaria de la tecnología, para investigar la forma de equilibrar los factores de bienestar ecológico con los avances tecnológicos. El mundo actual admite, entonces, la convivencia ciencia-tecnología como factores independientes o complementarios, según el enfoque que se tenga.



La ciencia y la tecnología constituyen un binomio fuertemente interrelacionado, que permanentemente se armoniza para mejorar la calidad de vida.

Es importante, en este punto, mencionar las controversias que, durante años, han enfrentado a la ciencia con las manifestaciones religiosas de los grupos humanos. Notable fue el enfrentamiento

entre la iglesia católica y Galileo Galilei, cuando éste afirmaba que la Tierra se movía alrededor del Sol, cosa que era negada por las autoridades eclesiásticas. La teoría de la evolución de las especies, creada por el investigador inglés Charles Darwin, aún genera encendidas polémicas en el mundo científico.

Independientemente de la posición que sobre el aspecto ciencia - religión se tenga, es necesario afirmar que el ser humano ha aceptado moverse en un mundo que tolere la presencia de estos dos factores, en función de un intento favorable de convivencia social.

Desde el punto de vista planteado anteriormente, y salvo posiciones muy irreductibles, el científico es libre de adoptar la creencia religiosa que lo haga feliz, mientras que quienes pregonan las bondades del ser religioso deben guardar un profundo respeto por las teorías científicas, tratando, en muchos casos, de hacer compatible esas teorías con sus puntos de vista.



PIENSA Y EXPLICA



- 1.12** Investiga la vida y obra de los siguientes personajes del mundo de la ciencia:
a) Galileo Galilei. b) Francis Bacon. c) Aristóteles.
- 1.13** ¿Qué es el método científico?
- 1.14** ¿Cuáles son los pasos del método científico?

- 1.15** ¿Qué es una hipótesis científica?
- 1.16** ¿Qué es una ley física?
- 1.17** ¿Cómo debe ser la actitud de un científico?
- 1.18** Explica cómo la ciencia puede, en algunos casos, verse obstaculizada por las afirmaciones de un científico reconocido. Di por qué lo afirmado por Aristóteles contuvo el avance científico por más de 2.000 años.
- 1.19** ¿Por qué un científico debe ser una persona honesta?
- 1.20** ¿Qué es una teoría científica?
- 1.21** ¿Es la Matemática importante en la Física? Explica.
- 1.22** Investiga la vida de Charles Darwin.
- 1.23** ¿Cuál es la diferencia entre ciencia y tecnología?
- 1.24** Da 3 ejemplos del impacto social de la tecnología.
- 1.25** Explica cómo la tecnología puede originar degradación del medio ambiente y cómo la ciencia puede ayudar a rectificar los errores que se cometen por el uso de los avances tecnológicos.
- 1.26** En la población de Yaguaraparo, de la Costa de Paria, en el Edo. Sucre, Venezuela, se ha observado en los últimos años la aparición de la llamada "palometa peluda" (*Hyglesia metabus*), la cual suelta un polvillo de su cuerpo que afecta severamente a la comunidad allí asentada. Se argumenta que esto se explica por la desaparición de los depredadores naturales del insecto. Explica cómo la tecnología pudo haber creado el problema y cómo la ciencia puede ayudar a resolverlo.
- 1.27** ¿Por qué el desarrollo tecnológico debe respetar las relaciones naturales de los organismos que hacen vida en un ecosistema?
- 1.28** ¿Pueden convivir la ciencia y la religión?
- 1.29** Da 2 ejemplos donde hay contradicción entre ciencia y religión.
- 1.30** ¿Podrías establecer la diferencia entre ciencia y religión?

- 1.31** A veces, hay referencia a la ciencia como una religión más, con los investigadores como sacerdotes y los misterios representados por los aspectos científicos, conocidos sólo por quienes se adentran en las profundidades de la misma. Analiza esta afirmación y expresa tu propia opinión.
- 1.32** Mucho se ha hablado de la responsabilidad de la ciencia en la generación de problemas sociales. Los científicos se defienden, diciendo que su actividad es una expresión genuina de la curiosidad humana y achacan a la tecnología los males que sus descubrimientos puedan generar. ¿Qué piensas de esto?
- 1.33** Actualmente, se discute sobre la posibilidad de clonar seres humanos. Ya se han obtenido resultados prácticos en plantas y animales (¿Has oído hablar sobre la oveja Dolly, clonada en Escocia, Inglaterra? En el área de clonación hay mucha discusión sobre los límites éticos de obtener nuevos seres humanos mediante ese procedimiento. Discute con tu profesor y compañeros las implicaciones éticas y los enfrentamientos que han surgido entre ciencia, tecnología y religión en este asunto.
- 1.34** ¿Qué piensas de las historias de fantasmas o apariciones? ¿Hay, en estos casos, contradicciones entre ciencia, creencias y religiones?
- 1.35** Considera la siguiente afirmación: "Si los extraterrestres quisieran destruirnos, ya lo hubieran hecho, porque tienen instrumentos atómicos y científicos con los cuales pueden hacer saltar en pedazos cualquier planeta del espacio. Recordemos que, mucho antes que nosotros, los terrícolas, conociéramos la Matemática, ya ellos navegaban en el espacio sideral". Analízala y establece si se trata de una hipótesis científica.



La ciencia, aunque parezca extraño, está ligada a las manifestaciones culturales de la especie humana. Los modelos físicos requieren de la capacidad de abstracción presentes en un pintor, en un poeta o en otros representantes del acervo cultural de nuestra civilización.

CAPÍTULO 2



Las Mediciones en Física

2.1 FÍSICA CLÁSICA Y FÍSICA MODERNA

Aun cuando en la Física los principios fundamentales están entrelazados entre sí como unidades completamente dependientes, tradicionalmente se ha establecido una división atada, cronológicamente, al desarrollo de esta ciencia. Así, se habla de Física Clásica y de Física Moderna. La primera, abarca hasta finales del siglo XIX y tiene como prioridad las siguientes áreas del conocimiento:

Mecánica: estudia, fundamentalmente, el movimiento, tratando de establecer las relaciones que permitan explicar hechos como la caída de un cuerpo desde cierta altura, la rapidez alcanzada por un móvil, los intercambios de energía en distintos fenómenos naturales, el movimiento de los astros.

Calor y temperatura: esta rama de la Física Clásica describe cómo son afectados los cuerpos cuando se someten a efectos térmicos. ¿Por qué el agua hierve? ¿Cuál es la causa de que el pavimento de una calle se fracture cuando se calienta? ¿Qué características deben tener las paredes de una casa para que no sea tan calurosa? Estas son unas pocas de las preguntas que trata de explicar esta especialidad de la Física.



El estudio de la temperatura y del calor es muy importante por los efectos sobre nuestra vida cotidiana.



Las perturbaciones en el agua, cuando se propagan, originan ondas, cuyo estudio son de mucha relevancia en la Física.

Movimiento ondulatorio: el estudio de las características de las ondas, sean éstas ondas sonoras u otras excitaciones que se propagan en diversos medios físicos, tales como la vibración de una cuerda, la propagación de ondas sísmicas en los terremotos, la formación de imágenes mediante ondas de sonido de altas frecuencias (ultrasonidos), como es el caso de la detección del feto dentro del vientre materno, son ejemplos de los fenómenos que podemos ubicar en esta área.

Óptica: trata de los fenómenos físicos asociados con los efectos luminosos. A pesar de que la propagación de la luz puede explicarse mediante movimientos ondulatorios, ha sido tradicional incluir, dentro de esta rama de la Física, efectos como la formación de imágenes en espejos, la concentración o dispersión de los rayos luminosos y la descomposición de la luz solar mediante prismas.



La óptica estudia los fenómenos físicos asociados con la luz, tales como la formación de imágenes en espejos.



Electromagnetismo: explica las interacciones eléctricas y magnéticas con la materia. Los fenómenos de atracción y repulsión de las cargas eléctricas, la generación de campos magnéticos, la propagación de las ondas electromagnéticas, la corriente eléctrica y sus efectos son, entre otros, algunos de los temas estudiados en esta área.

La señal de TV, que recibes en tu hogar, es una onda electromagnética con información de la imagen y del sonido.

La llamada Física Moderna comienza a desarrollarse a principios del siglo XX y trata algunos aspectos no explicables mediante la Física Clásica y estrechamente relacionados tanto con los secretos íntimos del átomo como con el movimiento a velocidades cercanas a la de la luz. La teoría de la relatividad de Einstein, la superconductividad, la Física Cuántica y la Física de Semiconductores, son ejemplos de los campos donde la Física Moderna ha desarrollado sus modelos.



PIENSA Y EXPLICA



- 2.1** Menciona algunos fenómenos asociados a las ramas de la Física, nombradas a continuación: **a)** Mecánica. **b)** Calor y temperatura. **c)** Movimiento ondulatorio. **d)** Óptica. **e)** Electromagnetismo.
- 2.2** Averigua qué son los semiconductores y qué es la superconductividad.
- 2.3** ¿Qué efectos ha tenido en la sociedad actual el desarrollo de la electrónica?
- 2.4** ¿Cuáles ramas de la Física crees que han hecho posible el desarrollo de la tecnología de los teléfonos celulares?
- 2.5** Muchas viviendas construidas en climas cálidos resultan intolerables para sus moradores, debido a las altas temperaturas que se generan en el interior de las mismas. ¿Qué factores físicos intervienen en el fenómeno?

2.2 SISTEMA INTERNACIONAL DE MEDIDAS

Como ya vimos, las hipótesis científicas deben ser probadas. Para ello, se hace uso de la experimentación. La importancia de la experimentación la plasmó, dramáticamente, Albert Einstein: "*Un solo experimento puede demostrar que me equivoco. La realización de innumerables experimentos no bastan para probar que estoy en lo cierto*".

La experimentación requiere la realización de medidas. Pero, ¿qué medimos? En el caso de un cuerpo que cae libremente, cantidades como el tiempo transcurrido y la rapidez con la cual el cuerpo desciende, pueden expresarse numéricamente y se definen como *magnitudes físicas*. Las magnitudes físicas son, por tanto, susceptibles de ser medidas. En general, podemos establecer:

Medir es comparar una magnitud con otra magnitud que se toma como unidad patrón.

Así, cuando decimos que una persona mide 1,70 m, estamos comparando su altura con la unidad patrón de la longitud: *el metro*. De acuerdo con esto, sabemos que la persona mide más de un metro y menos de dos metros. El conocimiento más cercano sobre lo que esta medida representa, lo estudiamos a continuación.

La medición de las magnitudes físicas, envuelve dos factores: *el valor numérico y la unidad en la cual es expresada*. Así, tenemos:

4 m (valor numérico: 4; unidad: metros)

10 kg (valor numérico: 10; unidad: kilogramos)

Hasta finales del siglo XVIII, las unidades de medida no estaban regidas por norma alguna, lo que dificultaba el intercambio de información en la comunidad científica y entorpecía las relaciones comerciales entre las naciones. Anteriormente, se hablaba de codos, cuartas, pies, leguas, etc., unidades que, en algunos casos, tenían que ver con las dimensiones del cuerpo humano correspondientes a los reyes. Así, por ejemplo, el codo era la distancia entre el codo y el extremo de la mano; el pie correspondía a la medida del pie humano. Como era de esperarse, la longitud de un codo o de un pie variaban de una persona a otra, impidiendo la uniformidad de las medidas.



La diferencia en la longitud de los pies humanos, tomados como patrones de medición, hacía imposible la uniformidad de las medidas.

Aun cuando en los países de habla inglesa todavía se utilizan en el quehacer diario algunas de las antiguas medidas, éstas fueron definidas, posteriormente, en base a patrones menos sujetos a variabilidad.

En vista de las dificultades ya descritas, el mundo científico de los siglos XVII y XVIII comenzó a proponer la adopción de patrones de medida, con las características siguientes :

- a. **Universalidad:** el patrón puede ser utilizado en cualquier área de la ciencia y en cualquier lugar del planeta.
- b. **Accesibilidad:** el patrón puede ser reproducido comercialmente, de manera que cualquiera pueda tener acceso al mismo.
- c. **Invariancia:** el patrón debe mantener sus características en el tiempo , bajo diversas condiciones ambientales.

En abril de 1795 se firma en París el decreto que dio origen al *Sistema Métrico Decimal*. El metro fue el primer patrón adoptado por la comunidad científica internacional. Se estableció, así, el metro como la *unidad fundamental de longitud*. La longitud es un concepto asociado con la idea de distancia. Al metro se le abre via con la letra *m*. Ahora bien, ¿cómo se define el metro? Su definición ha cambiado varias veces. Veamos, cronológicamente, cuáles han sido las definiciones de la unidad de longitud.

1889: el metro se definió como la diez millonésima parte (10^{-7}) de la distancia sobre un meridiano desde el ecuador al polo terrestre (ver fig. 2.1). Esta distancia se marcó en una barra de platino y se mantuvo en condiciones de temperatura y presión constantes en París.

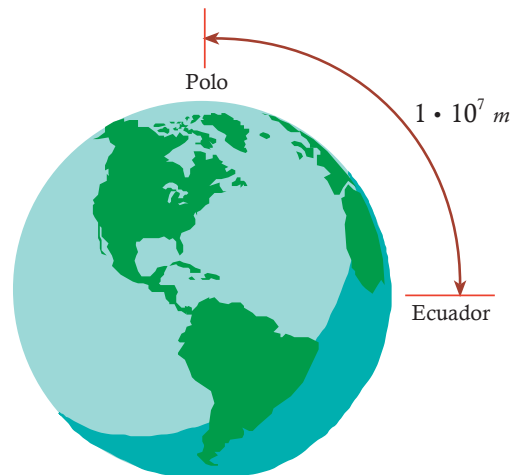


Fig. 2.1 En 1889 el metro se definió como la diezmillonésima parte de la distancia entre el ecuador y el polo terrestre, medida sobre uno de los meridianos.

1960: como consecuencia del perfeccionamiento de las técnicas ópticas, se determinó que las marcas, cuya separación definía al metro sobre la barra de platino, eran ambiguas. Se definió, entonces, al metro en base a longitud de onda de la luz anaranjada emitida por un isótopo del elemento Kriptón en estado gaseoso (^{86}Kr). Se hizo equivaler el metro a 1.650.763,73 longitudes de onda de esa luz (ver fig. 2.2).

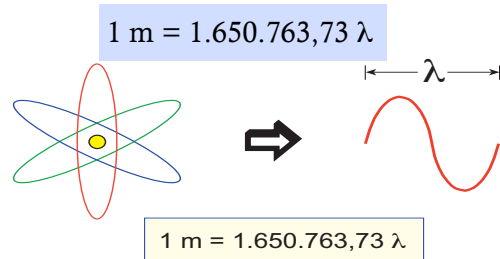


Fig. 2.2 En 1960 se definió el metro en base a la longitud de onda de un isótopo del elemento químico Kriptón.

1983: en la búsqueda de una mayor exactitud, en la XVII Conferencia General de Pesas y Medidas se estableció el patrón que, actualmente, está vigente y que define al metro como la distancia que recorre la luz en el vacío en $1/299.792,458$ segundos (ver fig. 2.3).

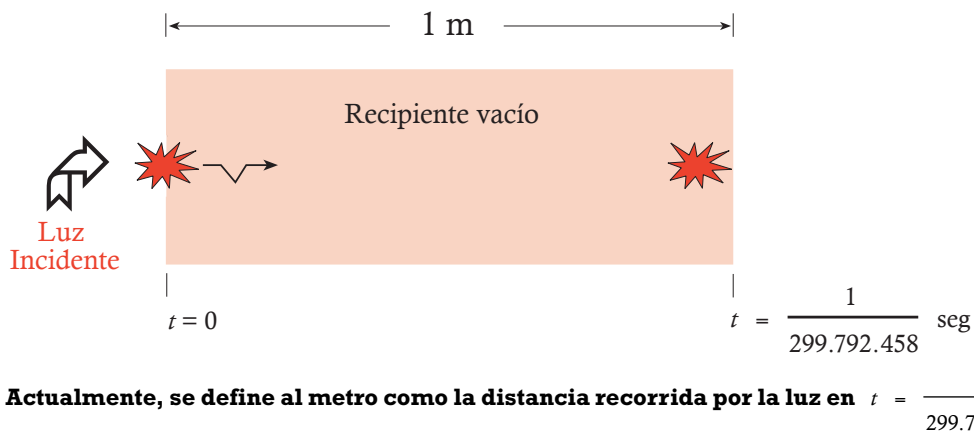


Fig. 2.3 Actualmente, se define al metro como la distancia recorrida por la luz en $t = \frac{1}{299.792.458}$ seg.

Fue, también en 1960, cuando se acordó adoptar el *Sistema Internacional de Medidas* (SI) con el *metro* (m) como unidad de longitud, el *kilogramo* (kg) como unidad de masa y el *segundo* (s) como unidad de tiempo, tal como lo indica la fig. 2.4.

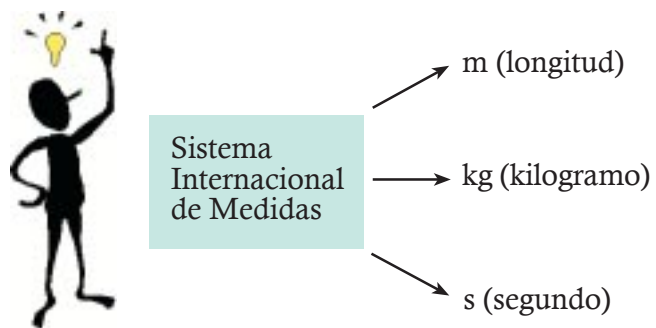


Fig. 2.4. En el Sistema Internacional los patrones adoptados originalmente fueron el metro, el kilogramo y el segundo.



La masa de un cuerpo depende de la cantidad de materia que posee.

La masa de un cuerpo es un concepto usualmente asociado a la cantidad de materia que posee. En un principio, el kilogramo se definió como la masa de un litro de agua bajo ciertas condiciones de temperatura y de presión. En 1901, se definió el kilogramo patrón como la masa de un cilindro constituido por una aleación de Platino e Iridio. Este patrón se conserva en Francia, en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas. Hasta ahora, no se ha modificado este patrón.

El tiempo se definió, en principio, en base al día solar medio; es decir, la duración de una revolución completa de la Tierra alrededor del Sol, que corresponde a 86.400 segundos.

De acuerdo a esto, el segundo equivalía a $\frac{1}{86.400}$ partes del día solar medio. La exactitud de esta definición se vio comprometida por la disminución gradual de la velocidad de la Tierra y porque hay variaciones en el día solar medio de un año al otro.

En la búsqueda de un patrón más exacto, en 1967 se definió el segundo en base a un patrón atómico: un segundo corresponde a la duración de 9.192.631.770 períodos de un átomo de Cesio, cuando vibra de cierta forma (Fig. 2.5).

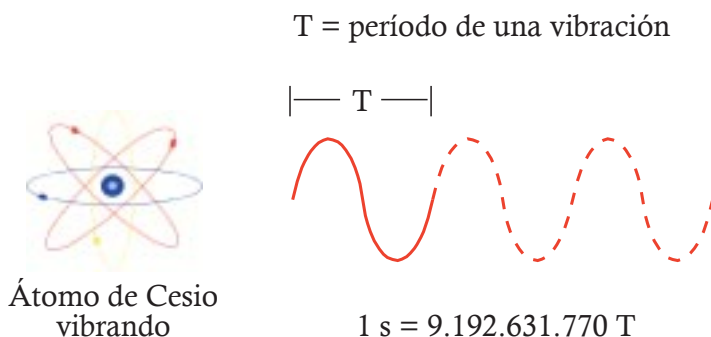


Fig. 2.5 El segundo se define como 9.192.631.770 veces el período de vibración de un átomo de Cesio.

Aun cuando el metro, el kilogramo y el segundo fueron los primeros patrones definidos en el SI, posteriormente se agregaron otros patrones de medida, que completan el cuadro de las *unidades físicas básicas*. En la tabla 2.1 se presenta el cuadro de estas unidades.

Cantidad	Unidad SI	Abreviatura
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Corriente eléctrica	ampere	A
Temperatura	kelvin	K
Cantidad de materia	mol	mol
Intensidad luminosa	candela	cd

Tabla 2.1 Unidades físicas básicas en el Sistema Internacional (SI).

A partir de las unidades básicas se han establecido las llamadas *unidades derivadas*, que se definen a partir de las unidades básicas. Como ejemplos de unidades derivadas, tenemos:

Cantidad	Unidad derivada
Rapidez	m/s
Densidad	kg/m ³
Fuerza	kgm/s ²

Es necesario acotar que, en un comienzo, al sistema en el cual el metro (m), el kilogramo (kg) y el segundo (s) eran las unidades básicas se le denominó sistema MKS (metro, kilogramo, segundo). Con la adición de otras unidades (ver tabla 2.1) al sistema de unidades básicas se le llamó *Sistema Internacional* (SI).



PIENSA Y EXPLICA



- 2.6** ¿Por qué es necesario tener un sistema de medidas?
- 2.7** A los efectos de una medida, ¿de cuáles partes consta una magnitud física?
¿Cuál es la diferencia entre esas partes?
- 2.8** ¿Qué es un patrón de medida?

- 2.9** ¿Por qué es conveniente tener un patrón de medida?
- 2.10** La cuarta es una medida que se aplica extendiendo la mano y observando cuántas unidades tiene el objeto a medir. Explica la ventaja y la desventaja de esa unidad de medida.
- 2.11** El kilogramo patrón se conserva en París. ¿Por qué no es posible guardar un metro patrón o un segundo patrón en un sitio cualquiera?
- 2.12** Averigua la masa aproximada de una célula humana, de una mosca, de un avión 747, de la Tierra. ¿Cuál es tu masa en kg?
- 2.13** Averigua la medida aproximada de: los diámetros de un átomo, de una bacteria y del Sol, el largo de una ballena, de un cocotero y de tu altura.
- 2.14** ¿Cuánto dura una sesión de clase? ¿Cuánto duró el imperio español? ¿Qué duración tiene la noche? ¿Cuánto tiempo utilizas para estudiar?
- 2.15** Se argumenta que es más conveniente medir la longitudes en metros y en centímetros que en yardas y en pulgadas. Averigua por qué.
- 2.16** ¿Podrías utilizar tu pulso como una unidad de tiempo?
- 2.17** ¿Cuál es la diferencia entre el sistema MKS y el SI?
- 2.18** ¿Cuáles son las unidades físicas básicas? ¿Cuáles, las derivadas?

2.3 MÚLTIPLOS Y SUBMÚLTIPLOS DE LAS UNIDADES FUNDAMENTALES

En muchos casos, las unidades fundamentales: el metro, el kilogramo y el segundo, no son las más convenientes para expresar las medidas de las variables físicas. Por ejemplo, es más conveniente expresar la distancia desde Caracas a New York en kilómetros que en metros. Por el contrario, la altura de una botella de refresco es más conveniente expresarla en centímetros que en metros.

Por lo dicho anteriormente, se utilizan con frecuencia los múltiplos y submúltiplos de las unidades fundamentales. Las tablas 2.2 y 2.3 muestran los múltiplos y submúltiplos más usados del metro y del kilogramo.

En el caso del patrón de tiempo el segundo, hay eventos científicos cuya duración es muy pequeña, como en el caso del tiempo que necesita la luz para cruzar un átomo, en tanto

Nombre	Equivalencia en metros
kilómetro (km)	1.000
hectómetro (hm)	100
decámetro (dam)	10
metro (m)	1
decímetro (dm)	0,1
centímetro (cm)	0,01
milímetro (mm)	0,001

Tabla 2.2 Múltiplos y submúltiplos más usados del metro.

Nombre	Equivalente en gramos
kilogramo (kg)	1.000
hectogramo (hg)	100
decagramo (dag)	10
gramo (g)	1
decigramo (dg)	0,1
centigramo (cg)	0,01
miligramo (mg)	0,001

Tabla 2.3 Submúltiplos más usados del kilogramo.

que hay eventos cuya duración es muy grande, como el tiempo que tarda la luz en llegar desde lejanos confines del universo, hasta la Tierra. Para la unidad de tiempo, la tabla 2.4 muestra los múltiplos y submúltiplos más utilizados del segundo.

Nombre	Equivalente en segundos
hora (h)	3.600
minuto (min)	60
segundo (s)	1
milisegundo (ms)	0,001 (10^{-3})
microsegundo (μ s)	0,000001 (10^{-6})

Tabla 2.4 Múltiplos y submúltiplos más usados del segundo.

Es importante, además, que se conozcan los prefijos generalmente utilizados en el sistema SI. En estudios más avanzados, éstos aparecen con frecuencia. La tabla 2.5 muestra tales prefijos, su abreviatura y sus valores numéricos expresados en potencias de 10.

Prefijo	Abreviatura	Potencias de 10
tera	T	10^{12}
giga	G	10^9
mega	M	10^6
kilo	k	10^3
hecto	h	10^2
deca	da	10^1
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
mili	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
fento	f	10^{-15}

Tabla 2.5 Prefijos usados en el Sistema Internacional (SI).

Ejemplo 2.1

Transforma las siguientes unidades:

- a) $8,54 \cdot 10^{-5}$ kg a g b) 740 horas en semanas c) $13,56 \mu\text{m}$ a pm.

Solución

a) De acuerdo a la tabla 2.3, 1 mg equivale a 10^{-3} kg. O, equivalentemente, 1 kg equivale a 10^3 mg. Para pasar de kg a mg debemos multiplicar por 10^3 :

$$8,54 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \Rightarrow 8,54 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3 \text{ g} \Rightarrow 8,54 \cdot 10^{-2} \text{ g}$$

b) Una semana tiene 7 días y cada día tiene 24 horas. Por tanto, una semana tiene un número de horas igual a $7 \cdot 24 = 168$. Luego, 740 horas equivalen a:

$$\frac{740}{168} = 4,40 \text{ semanas}$$

c) $13,56 \mu\text{m}$ equivalen a $13,56 \cdot 10^{-6}$ m. Para reducir este último valor a pm, hay que multiplicar por 10^{12} o, equivalentemente, dividir por 10^{-12} :

$$13,56 \cdot 10^{-6} \text{ m} \Rightarrow 13,56 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{12} \text{ pm} \Rightarrow 13,56 \cdot 10^6 \text{ pm}$$



PROBLEMAS



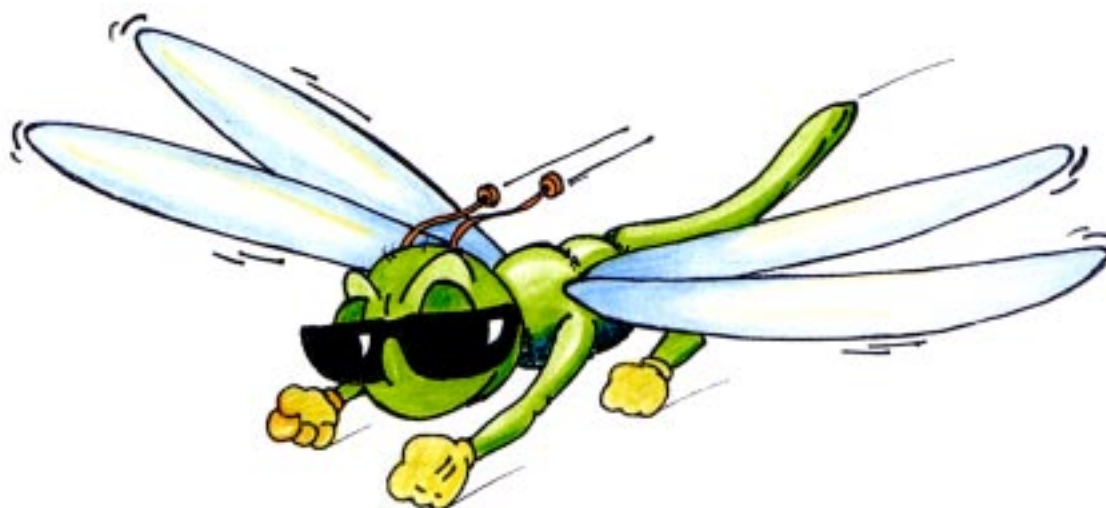
2.1 Transforma las siguientes unidades:

- a) 10,5 m a km b) 4,67 cm a mm c) 28,3 kg a g
d) 0,50 h a min e) 45 ms a s f) 18.000 μs a min

2.2 Transforma las siguientes unidades:

- a) $2,4 \text{ M}\Omega$ a Ω b) 10 nA a A c) 22 pF a μF
d) 0,857 kHz a Hz e) 12 Gbytes a bytes f) 94.000 μV a V

CAPÍTULO 3



Movimiento Rectilíneo

3.1 ¿QUÉ ES EL MOVIMIENTO?

Cuando un objeto cambia de posición con respecto a un punto de referencia, se dice que está en movimiento. Entonces, mediante este concepto, es relativamente fácil para un observador reconocer cuándo un cuerpo está en movimiento: basta con ver que todo el cuerpo, o parte de él, ha cambiado de posición respecto a la referencia. El movimiento es un fenómeno físico presente en el más mínimo aspecto de nuestra vida cotidiana. Estamos tan familiarizados con el mismo, que algunas veces pasa desapercibido. Todo se mueve, aun cuando nuestros sentidos no puedan apreciar la omnipresencia del fenómeno.

Consideremos un vehículo, tripulado por un chofer, en movimiento a lo largo de una avenida. Para poner en evidencia la variedad de movimientos implícitos en esta observación, hacemos notar lo siguiente:

- Un observador externo al vehículo, colocado en una acera de la avenida, notará que el mismo cambia de posición con respecto a la acera y, por tanto, está en movimiento. Para él, el automóvil y sus tripulantes se están moviendo.
- Los cauchos del vehículo están rotando; por lo tanto, también se mueven.

- Varios componentes del motor del vehículo se mueven para hacerlo avanzar.
- El agua y el aceite presentes en el motor se mueven para mantener una temperatura y una lubricación adecuadas en el motor.
- Los pasajeros del vehículo contienen fluidos (sangre, agua, etc.) en continuo movimiento. Sus partes corporales (manos, pestañas, pulmones, etc.) se mueven como manifestación de la vida.
- A nivel molecular y atómico, también hay movimiento de todos los componentes del sistema (vehículo + pasajeros). A pesar de que este movimiento pueda pasar inadvertido, ese continuo flujo y vibración de los átomos es el responsable, entre otras cosas, de la generación de electricidad y calor en el vehículo y de los procesos vitales en los pasajeros.



El movimiento es un fenómeno físico siempre presente en nuestra vida cotidiana.

Como puede deducirse de lo anterior, la observación detallada de un fenómeno físico pone en evidencia la riqueza de movimientos presentes en el fenómeno. Si a la observación anterior de los movimientos del vehículo, agregamos que la Tierra recorre 30 km cada segundo en su movimiento de traslación alrededor del Sol y, con ella, nuestro vehículo y su tripulante, uno no puede más que admirarse de la riqueza contenida en una simple observación.

En este capítulo se describe el movimiento a lo largo de una trayectoria (concepto a definir posteriormente). Se estudian, además, los conceptos de *movimiento rectilíneo uniforme*, *rapidez*, *velocidad* y *aceleración*.

3.2 EL MOVIMIENTO ES RELATIVO

Cuando se describe el movimiento de un objeto siempre se tiene un punto o una posición de referencia. En la fig. 3.1, el conductor del vehículo (A) observa a una persona en la calle moviéndose hacia la izquierda de la página, mientras que esa persona (B) observa al vehículo moviéndose a la derecha de la página. En el primer caso, el observador A es la referencia y el observador B se mueve con respecto a A. En el segundo caso la referencia es el observador B, mientras que A se mueve con respecto a B.



Fig. 3.1 El observador A (conductor) ve moverse al vehículo hacia la izquierda de la página, mientras que el observador B ve moverse al vehículo hacia la derecha de la página.

Otro ejemplo que ilustra la relatividad del movimiento se muestra en la fig 3.2. La lancha con dos tripulantes, A y B, se mueve hacia la derecha del observador C, mientras éste contempla desde la playa. Para A, el tripulante B está inmóvil, mientras que C observa que B se mueve hacia la derecha. Es decir, cuando A es la referencia, B no se mueve, mientras que cuando C es la referencia, B sí se mueve.

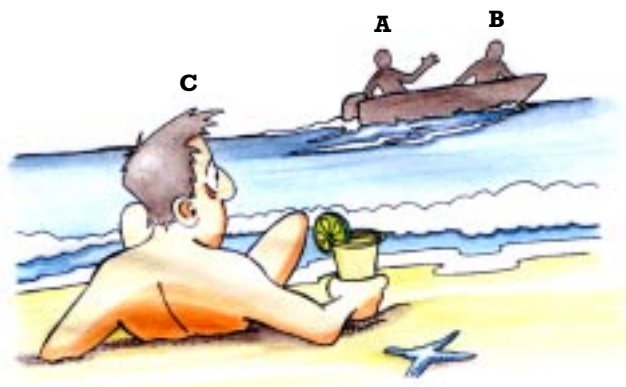


Fig. 3.2 El movimiento es relativo. Para A, quien tripula la lancha junto con B, éste no se mueve, mientras que para C, quien observa desde la playa, B se mueve hacia la derecha.

La relatividad del movimiento permite afirmar que todo se mueve. Los objetos que para un observador parecen estar en reposo, para otro están en movimiento. Así, por ejemplo, la mesa, usualmente utilizada para la cena, puede estar inmóvil para los comensales; sin embargo, dicha mesa se mueve a 30 kilómetros por segundo con respecto al Sol. Es de suma importancia, entonces, definir la referencia con respecto a la cual un objeto está en movimiento. Cuando en este libro no se mencione la referencia, se considerará que el movimiento es relativo a la superficie terrestre.

3.3 RAPIDEZ. RAPIDEZ INSTANTÁNEA Y RAPIDEZ MEDIA.

La *rapidez* es una medida de la distancia recorrida por un objeto en un tiempo determinado. La *rapidez* se expresa en unidades de longitud divididas entre unidades de tiempo. Así, se habla de

una rapidez de 70 kilómetros por hora, la cual establece que un móvil recorre 70 km en una hora. Similarmente, si decimos que la Tierra se mueve con una rapidez constante de 30 km por segundo relativa al Sol, estamos afirmando que cada segundo la Tierra recorre 30 km de su trayectoria alrededor del Sol. En estos casos mencionados, la rapidez se expresa como 70 km/h y 30 km/s, respectivamente. La raya inclinada (/) se lee, en este caso, “por”. En la tabla 3.1 se muestra la rapidez media de algunos seres vivos y de ciertos fenómenos físicos.

Ser vivo o fenómeno físico	Rapidez
Hormiga corriendo	5 cm/s
Hombre caminando	2 m/s
Delfín nadando	20 km/h
Propagación de la luz	300.000 km/s
Batido de las alas de un colibrí	80 batidos/s
Transmisión del impulso nervioso	100 m/s

Tabla 3.1 Rapidez de algunos seres vivos y de ciertos fenómenos físicos.

Como puedes notar, la rapidez puede expresarse en varias unidades (km/h, m/s, etc.), dependiendo de cuál de ellas resulta más cómoda, según se trate de un fenómeno físico que tenga lugar más rápidamente o más lentamente que otro. Así, es más conveniente expresar la velocidad de una hormiga en centímetros por segundo (cm/s) que en kilómetros por hora (km/h). La velocidad de un hombre caminando es más conveniente expresarla en metros por segundos (m/s), pues, de esta forma, podemos comprobar más fácilmente el valor de esta medida mediante la experimentación adecuada.

Rapidez Instantánea

Cuando un cuerpo se mueve, su rapidez puede variar a lo largo de su recorrido. Esto puede notarse cuando observamos el movimiento de un vehículo, a lo largo de una vía. Cuando el conductor del vehículo se acerca a una intersección, seguramente disminuirá la rapidez del mismo. Una vez superada la intersección, el conductor aumentará la rapidez. Entre la disminución y el aumento de rapidez puede haber una amplia variación de la misma. La *rapidez instantánea* se define como la rapidez que tiene un objeto en cualquier instante de tiempo. Estas variaciones se pueden apreciar mirando al velocímetro del vehículo. Similarmente, cuando un pájaro, en su trayectoria de vuelo, se posa en la rama de un árbol, su rapidez es nula, mientras que cuando vuela, su rapidez puede variar constantemente.

Rapidez Media. Rapidez Uniforme.

Consideremos un vehículo en movimiento desde el punto A al punto B de la fig. 3.3. Supongamos que en el punto A el medidor de distancia del automóvil se pone a cero.



La rapidez instantánea de un pájaro que descansa en una rama es cero, mientras que al transcurrir cierto tiempo de vuelo puede ser 10 m/s.

Cuando el vehículo alcanza el punto B el medidor de distancia tendrá una lectura que llamaremos d .

La rapidez media se define como la distancia total, d , recorrida por el vehículo dividida entre el tiempo, t , empleado en ir desde A hasta B.

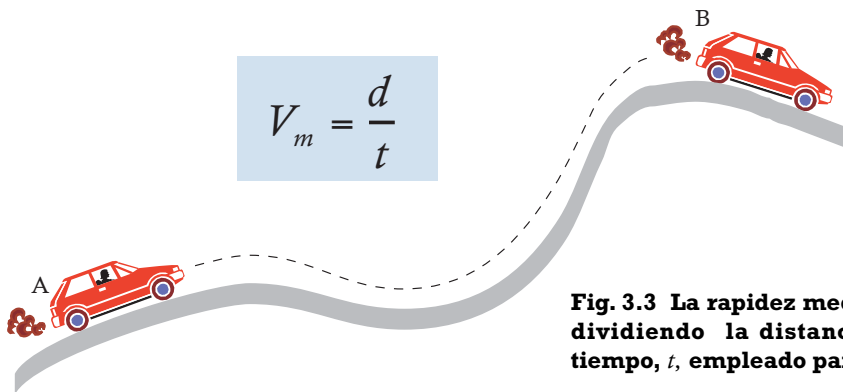


Fig. 3.3 La rapidez media del vehículo se obtiene dividiendo la distancia recorrida, d , entre el tiempo, t , empleado para ir desde A hasta B.

Entonces, la rapidez media puede expresarse como:

$$\text{Rapidez Media} = \frac{\text{Distancia total recorrida } (d)}{\text{Tiempo } (t) \text{ empleado en recorrer la distancia}} \quad (3.1)$$

Si designamos la rapidez media como V_m , la relación (3.1) se expresa como:

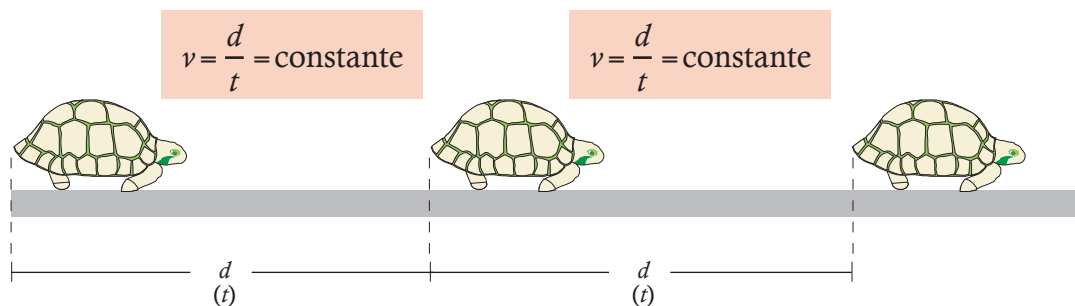
$$V_m = \frac{d}{t} \quad (3.2)$$

Observa que el concepto de rapidez media no toma en cuenta las variaciones de rapidez que puedan tener lugar durante el recorrido de un móvil. En el cálculo de la rapidez, sólo cuenta la distancia total recorrida y el tiempo utilizado para recorrer la distancia. La

rapidez instantánea, en cualquier punto del recorrido, es completamente independiente de la rapidez media.

La distancia d se expresa en unidades de longitud (metros, kilómetros, millas, centímetros), mientras que el tiempo t se expresa en segundos, minutos, horas. De esta forma, según la relación (3.2) y lo visto anteriormente, la rapidez se expresa en unidades de longitud divididas entre unidades de tiempo, por ejemplo km/h, m/s, cm/s.

Cuando la rapidez permanece siempre igual durante un recorrido, se dice que la rapidez es *uniforme* o *constante*. Un ejemplo clásico es el de la rapidez de la luz, la cual se propaga en el vacío (o en el espacio interestelar) a una rapidez constante de 300.000 km/s. El sonido se propaga en el aire, bajo ciertas condiciones, con una rapidez constante de 340 m/s. Es decir, la luz recorre, cada segundo, una distancia de 300.000 kilómetros; mientras que el sonido recorre, cada segundo, una distancia de 340 metros. En realidad, la gran mayoría de movimientos asociados a nuestro quehacer cotidiano tiene lugar a rapidezces que no son uniformes. Para convencerte de que esto es así, examina el movimiento de un pájaro, del viento o piensa en las variaciones de la rapidez que experimenta un automóvil en su recorrido.



Si la tortuga recorre la distancia d en tiempos iguales, su rapidez es uniforme o constante.

Veamos ahora la relación entre rapidez uniforme, rapidez media y rapidez instantánea. Para ello, nos referiremos a la fig. 3.4.

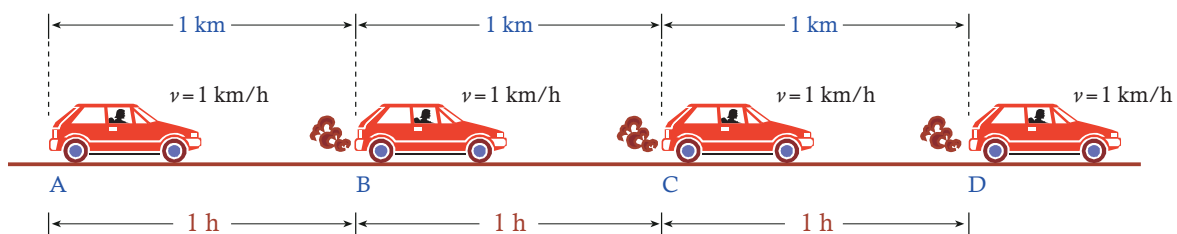


Fig. 3.4 Si la rapidez es uniforme, su valor es igual al de la rapidez media y al de la rapidez instantánea.

El vehículo parte del punto A con una rapidez constante de 1 km/h y alcanza el punto D. Que la rapidez sea uniforme con un valor de 1 km/h significa que cada hora recorre 1 kilómetro. Así, la primera hora se desplaza 1 km hasta llegar al punto B. La segunda hora alcanza el punto C y ha recorrido 2 km. Finalmente, a la tercera hora el vehículo ha recorrido 3 km y se encuentra en el punto D. La rapidez media entre los puntos A y D está dada por:

$$V_{mAD} = \frac{\text{Distancia entre A y D}}{\text{Tiempo transcurrido en ir desde A hasta D}} = \frac{3 \text{ km}}{3 \text{ h}} = 1 \text{ km/h}$$

Que coincide con la rapidez uniforme. Ahora bien, como la rapidez es uniforme, es la misma en todos los puntos del recorrido y, por tanto, es igual a la rapidez instantánea. Podemos afirmar, de acuerdo a lo anterior:

Si la rapidez es uniforme, su valor es igual al de la rapidez media y al de la rapidez instantánea.

Conversión de unidades de rapidez

Para un cuerpo en movimiento con rapidez constante, de la relación (3.2) se pueden obtener las siguientes expresiones:

$$V_m = \frac{d}{t} \Rightarrow \boxed{d = V_m \cdot t} \quad (3.3) \quad \Rightarrow \quad \boxed{t = \frac{d}{V_m}} \quad (3.4)$$

Si la rapidez media es de 80 km/h y deseamos saber la distancia recorrida en 2 horas, puede usarse la relación (3.3):

$$d = 80 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 2 \text{ h} = 160 \text{ km}$$

Observa que la unidad de tiempo, en este caso, horas, se cancela para que el resultado final se obtenga en unidades de longitud, en este caso, kilómetros. Supongamos ahora que deseamos saber la distancia recorrida en 30 minutos:

$$d = 80 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 30 \text{ min}$$

Se cometería un error si intentáramos cancelar horas con minutos para obtener la distancia:

$$d = 80 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 30 \text{ mín} \quad (\text{jerror!})$$

Para evitar el error es necesario *convertir* las horas a minutos o los minutos a horas. Para ello, se considera que la letra *h* (horas), que aparece en el denominador, se refiere a 1 hora, mientras que las letras *min* (minutos) que figura en el numerador se refiere a 1 minuto. Luego, para convertir 1 hora a minutos multiplicamos el denominador por 60:

$$d = \frac{80 \text{ km}}{60 \text{ min}} \cdot 30 \text{ min} = 40 \text{ km}$$

Si convertimos minutos a horas, dividimos 1 min, que figura en el numerador, entre 60:

$$d = 80 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{30}{60} \text{ h} = 40 \text{ km}$$

En los dos casos, el resultado es el mismo. Lo anterior nos indica que debemos ser muy cuidadosos cuando se trabaja con distintas unidades, de manera que los resultados sean consistentes con lo que se desea calcular. Es decir, la distancia debe resultar expresada en unidades de longitud y el tiempo en unidades de tiempo.



PIENSA Y EXPLICA



- 3.1 ¿Qué es el movimiento?
- 3.2 ¿El movimiento siempre tiene lugar en una trayectoria recta?
- 3.3 ¿Qué tipos de movimientos puedes identificar en el vuelo de un colibrí?
- 3.4 ¿Qué distancia recorre tu cuerpo alrededor del Sol en 10 segundos?
- 3.5 ¿Cuándo el movimiento es rectilíneo? ¿Cuándo es curvilíneo?
- 3.6 ¿Cómo es el movimiento de una hormiga al caminar: rectilíneo o curvilíneo?
¿El de un pájaro? ¿El de un pez al nadar?
- 3.7 Alguien comenta: “Voy a tomar la nave de la Tierra (nuestro planeta) para viajar desde Caracas a New York”. Estudia el comentario y establece si esto es posible.
- 3.8 ¿Por qué se afirma que el movimiento es relativo?

- 3.9** ¿Todo movimiento es relativo?
- 3.10** Una persona que viaja en un automóvil por una carretera, deja caer una pelota verticalmente. Un observador, colocado a un lado de la carretera, observa la maniobra. ¿Qué trayectoria describe la pelota tanto para el viajero como para el observador? Dibuja esa trayectoria.
- 3.11** Un demente viaja en un vehículo que se mueve velozmente por una carretera. A medida que el vehículo avanza, observa los postes de energía eléctrica que se mueven rápidamente en sentido contrario y emite la siguiente opinión: “de regreso me vengo en poste” ¿Está él equivocado? ¿Dónde estaría el origen de su error?
- 3.12** Un autobús de 30 puestos se mueve a lo largo de una autopista. Un pasajero que va en la parte delantera voltea hacia el fondo del autobús y observa a otro pasajero que permanece sentado. ¿Se está moviendo este último pasajero?
- 3.13** Un tren se mueve desde un lugar a otro de la superficie terrestre. La Tierra, planeta sobre el cual el tren está en movimiento, gira sobre su eje (rotación) y, a la vez, gira alrededor del Sol (traslación). Explica la relatividad del movimiento para un pasajero que va en el tren y para el mismo tren como un todo.
- 3.14** Un muchacho, montado en la parte trasera de una camioneta, lanza una pelota verticalmente hacia arriba. Determina si la pelota caerá en sus manos en caso de que: **a)** La camioneta esté detenida. **b)** Si está en movimiento.
- 3.15** ¿Qué es rapidez?
- 3.16** ¿En qué unidades se expresa la rapidez?
- 3.17** ¿Por qué es conveniente expresar, en algunos casos, la rapidez en m/s y no en km/h o en cm/s?
- 3.18** ¿Qué se mueve más rápido, un pájaro o un automóvil?
- 3.19** Según tu criterio, ¿en qué unidades debe expresarse la rapidez de desplazamiento de un caracol?
- 3.20** ¿Qué es rapidez instantánea?

- 3.21** ¿Qué es rapidez media? ¿Cuál es la diferencia con rapidez instantánea?
- 3.22** ¿Qué es rapidez uniforme? ¿Cuál es la diferencia respecto a la rapidez instantánea? ¿Cuál es la diferencia en relación con la rapidez media?
- 3.23** ¿Cómo determinarías tu rapidez media cuando caminas?
- 3.24** La rapidez de la luz en el vacío (300.000 km/h) y la del sonido en el aire (340 m/s) son ejemplos de rapidez constante. ¿Podrías citar otros ejemplos donde la rapidez es también constante?
- 3.25** ¿Qué mide el velocímetro de un carro, la rapidez media o la rapidez instantánea?

Ejemplo 3.1

a) ¿Cuál es la rapidez media de un vehículo que recorre la distancia de 300 km entre Puerto La Cruz y Caracas, en un tiempo de 4 horas? b) ¿Podrías usar la información anterior para determinar la distancia entre Puerto La Cruz y Cúpira, esta última una población ubicada entre Puerto La Cruz y Caracas? c) ¿Cuál es la rapidez instantánea cuando el vehículo pasa por Cúpira?

Solución

a) De acuerdo con la definición de rapidez media, V_m , podemos escribir:

$$V_m = \frac{\text{Distancia total recorrida}}{\text{Tiempo total empleado}} = \frac{d}{t} = \frac{300 \text{ km}}{4 \text{ h}} = 75 \text{ km/h}$$

Es decir, en promedio, el vehículo recorre 75 km cada hora. La rapidez instantánea variará a lo largo de la trayectoria del mismo.

b) Si usáramos la relación $V_m = d/t$ para calcular la distancia entre Puerto La Cruz y Cúpira, tendríamos:

$$d = V_m \cdot t$$

Sin embargo, la rapidez media calculada, $V_m = 75 \text{ km/h}$, corresponde a la trayectoria entre Puerto La Cruz y Caracas y no podría usarse para calcular la distancia entre Puerto La Cruz y Cúpira.

c) Con los datos del problema, no hay manera de saber la rapidez instantánea del vehículo, cuando pasa por Cúpira. Sólo alguien que vaya dentro del vehículo y mire su velocímetro, podría determinarla.

Ejemplo 3.2

Un hombre recorre en línea recta una distancia de 2 km en 0,5 h. Determina la rapidez media. Si esta rapidez fuera constante, ¿qué tiempo empleará en recorrer 7 km?

Solución

Según la relación $V_m = d/t$, tenemos:

$$V_m = \frac{2 \text{ km}}{0,5 \text{ h}} = 4 \text{ km/h}$$

Si la rapidez permanece constante, la rapidez media es $V_m = 4 \text{ km/h}$ y podemos escribir, según la relación (3.4):

$$t = \frac{d}{V_m} = \frac{7 \text{ km}}{4 \frac{\text{km}}{\text{h}}} = 1,75 \text{ h}$$

Ejemplo 3.3

El dinosaurio de la fig . 3.5 pesaba más de 30 toneladas y tenía una longitud de aproximadamente 20 metros. La distancia entre dos huellas consecutivas era de casi 3 metros. Las evidencias de los fósiles encontrados demuestran que la longitud L de sus piernas era de 2,7 m. Determina la rapidez media con la cual caminaba el dinosaurio, si se estima que el tiempo promedio para que diera un paso está dado por la relación:

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{2L}{3g}}$$

Donde g es la aceleración de gravedad cuyo valor aproximado es 10 m/s^2 .



Fig. 3.5 ¿Cuál es la rapidez con que se mueve el dinosaurio? Ejemplo 3.3.

Solución

El tiempo que tarda el dinosaurio en dar un paso, puede calcularse mediante la relación especificada en el enunciado:

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{2L}{3g}} = 2\pi \sqrt{\frac{2 \cdot 2,7 \text{ m}}{3 \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = 2\pi \sqrt{\frac{5,4}{30} \text{ s}^2} = 2,66 \text{ s}$$

La rapidez media es igual a la longitud del paso dividida entre el tiempo anterior:

$$V_m = \frac{3 \text{ m}}{2,66 \text{ s}} = 1,3 \text{ m/s}$$

Ejemplo 3.4

Un pájaro vuela en línea recta, con una rapidez constante de 32 km/h, de una rama A hasta una rama B, en un tiempo de 0,5 horas. Luego, se devuelve en línea recta hacia la rama A, recorriendo una distancia de 10 km (punto C), con una rapidez constante de 50 km/h ¿Cuál es su rapidez media? Ver fig. 3.6.

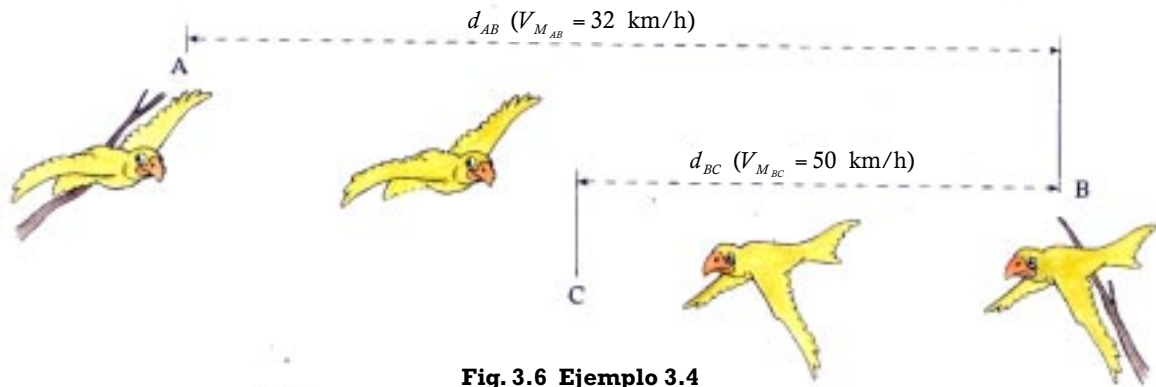


Fig. 3.6 Ejemplo 3.4

Solución

La distancia d , recorrida por el pájaro desde la rama A hasta la rama B, está dada por:

$$d_{AB} = V_{m_{AB}} \cdot t_{AB} = 32 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 0,5 \text{ h} = 16 \text{ km}$$

Cuando el pájaro se devuelve, llega hasta el punto C en un tiempo:

$$t_{BC} = \frac{d_{BC}}{V_{m_{BC}}} = \frac{10 \text{ km}}{50 \text{ km/h}} = 0,2 \text{ h}$$

La distancia total recorrida desde A hasta B y, luego, hasta C es:

$$d_{AC} = 16 \text{ km} + 10 \text{ km} = 26 \text{ km}$$

El tiempo total empleado en recorrer la anterior distancia está dado por:

$$t_T = 0,5 \text{ h} + 0,2 \text{ h} = 0,7 \text{ h}$$

La rapidez media se obtiene dividiendo la distancia total recorrida entre el tiempo total empleado:

$$V_m = \frac{26 \text{ km}}{0,7 \text{ h}} = 37,14 \text{ km/h}$$

Ejemplo 3.5

En la tabla 3.2 se muestra la rapidez de algunos animales en plena carrera. Exprésalas en las unidades señaladas en dicha tabla.

Animal	Rapidez	Expresarla en:
Guepardo	70 millas/h	km/h
Jirafa	32 millas/h	km/h
Gato	30 millas/h	m/s
Caracol	0,03 millas/h	cm/s

Tabla 3.2 Rapidez de algunos animales. Ejemplo 3.5.

Solución

Recuerda que 1 milla equivale a 1,6 km y que 1 km es equivalente a 1.000 m. Asimismo, 1 hora tiene 3.600 segundos.

$$\text{Guepardo: } 70 \text{ millas/h} \Rightarrow 70 \cdot 1,6 \text{ km/h} = 112 \text{ km/h}$$

$$\text{Jirafa: } 32 \text{ millas/h} \Rightarrow 32 \cdot 1,6 \text{ km/h} = 51,2 \text{ km/h}$$

$$\text{Gato: } 30 \text{ millas/h} \Rightarrow 30 \cdot 1,6 \text{ km/h} = 48 \text{ km/h} =$$

$$= 48 \cdot 1.000 \text{ m/h} = 48.000 \text{ m/h} = \frac{48.000}{3.600} \text{ m/s} = 13,33 \text{ m/s}$$

$$\text{Caracol: } 0,03 \text{ millas/h} \Rightarrow 0,03 \cdot 1,6 \text{ km/h} = 0,048 \text{ km/h} = \frac{0,048 \cdot 10^5}{3.600} \text{ cm/s} = 1,33 \text{ cm/s}$$



PROBLEMAS



3.1 La rapidez con la cual se mueve un barco es usualmente expresada en nudos. Un nudo equivale a 1,852 km/h. Una lancha que traslada pasajeros entre Cumaná y Punta de Piedras (Isla de Margarita) desarrolla una rapidez media de 16 nudos. Si la travesía tarda 2 horas, determina la distancia aproximada entre las mencionadas poblaciones.

3.2 La carretera Cumaná – Puer to La Cruz es una vía muy peligrosa, llena de curvas. Normalmente, un vehículo recorre esa trayectoria de 80 km en 1 hora y 10 minutos. ¿Cuál es la rapidez promedio del vehículo? La distancia en línea

recta entre las dos ciudades es alrededor de 32 km. Si se construyese una vía recta, ¿cuánto tardaría el vehículo en ir desde Cumaná hasta Puerto La Cruz?

- 3.3** Un hombre camina con una rapidez de 1 m/s . Si los rayos solares inciden sobre él, proyectando su sombra sobre una pared. ¿Qué se mueve más rápido, el hombre o su sombra?
- 3.4** Usando un cronómetro, ¿Cómo puedes determinar la rapidez de una persona que camina o que trota?
- 3.5** El sonido se propaga en el aire con una rapidez constante de 340 m/s . Una persona se para enfrente de una montaña lejana, grita y escucha el eco proveniente de la montaña. Mediante un cronómetro determina que el sonido tardó 4 segundos en ir y volver. ¿Cuál es la distancia entre la persona y la montaña?
- 3.6** El llamado “caballito del diablo” o libélula es un bello insecto volador. Posee 4 frágiles alas y puede volar con una rapidez de 50 km/h , lo cual le permite escapar, con frecuencia, de pájaros que se alimentan de insectos. El “caballito del diablo” puede ver con sus grandes ojos objetos inmóviles alejados 2 metros de él. ¿Cuánto tiempo tardará en capturar a un insecto pequeño colocado a esa distancia?
- 3.7** Un rayo puede producirse cuando se origina una descarga eléctrica entre dos nubes o entre una nube y la superficie terrestre. Este fenómeno va acompañado de un efecto luminoso y de un ruido característico, que provoca temor en quien lo escucha. Este ruido se propaga en el aire a la rapidez del sonido: 340 m/s . Si para un observador el tiempo que transcurre entre el momento cuando ve el rayo y cuando oye el ruido es de 10 segundos, determina la distancia aproximada entre el observador y el rayo.

3.4 VELOCIDAD. VELOCIDAD MEDIA Y VELOCIDAD INSTANTÁNEA.

El concepto de velocidad es, a menudo, confundido con el de rapidez. La diferencia fundamental es que la velocidad es una cantidad a la cual se asocia una determinada dirección. Cuando se dice que un vehículo viaja a 90 km/h estamos especificando su rapidez. Cuando afirmamos que viaja a 90 km/h *hacia el Este*, estamos especificando su velocidad. En otras palabras, la rapidez nos indica cuán rápido se mueve un objeto, mientras que la dirección nos dice cuán rápido y en qué dirección se mueve.

La fig. 3.7 ilustra los conceptos de rapidez y de velocidad. Ambas personas marchan con la misma rapidez, pero tienen velocidades diferentes, ya que uno se mueve hacia la izquierda y el otro hacia la derecha.

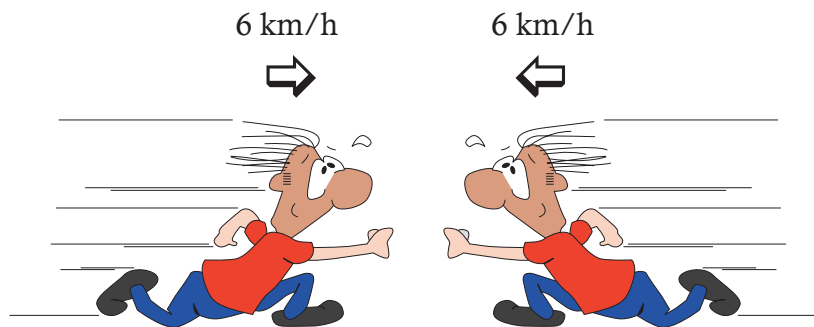


Fig. 3.7 Las dos personas se mueven con igual rapidez (6 km/h), pero tienen velocidades distintas, ya que una de ellas se dirige hacia la izquierda, mientras que la otra va hacia la derecha.

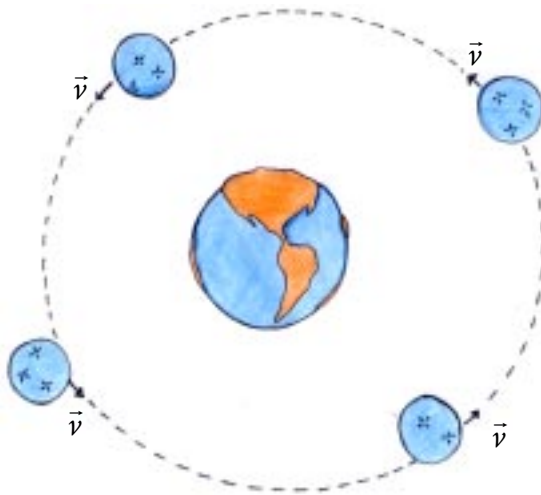


Fig. 3.8 Aun cuando la Luna gira a 910 km/s alrededor de la Tierra, su dirección cambia constantemente y, por tanto, su velocidad también cambia.

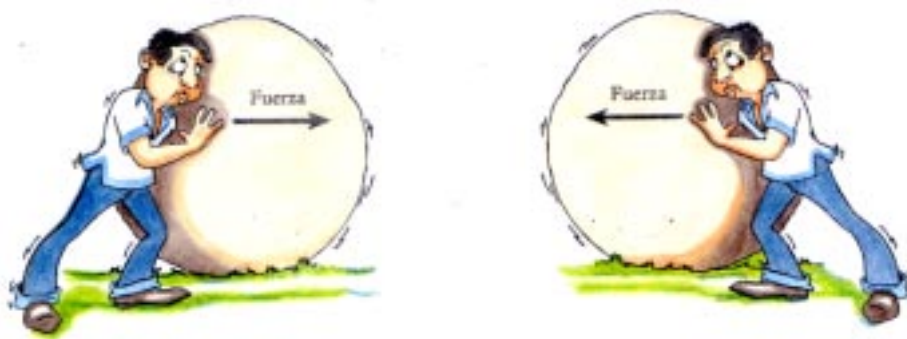
Es importante resaltar que un objeto que se mueva con una rapidez constante, no necesariamente se está moviendo con una velocidad constante. Para que la velocidad sea constante, tanto la rapidez del movimiento como la dirección del mismo tienen que ser constantes. Así, como lo muestra la fig. 3.8, aun cuando la rapidez de rotación de la luna alrededor de la tierra puede asumirse constante e igual a 910 km/s, su velocidad no es constante, ya que la dirección cambia permanentemente. Este cambio de dirección está simbolizado por la flechita mostrada.

Aquellas cantidades que, como a la velocidad, se les asocia una dirección, son denominadas *vectores*.

Escalares y Vectores

La diferencia entre cantidades escalares y vectoriales es sencilla. Una cantidad vectorial contiene información sobre la dirección, mientras que una cantidad escalar no posee esta información. Un ejemplo de un escalar es la cantidad de dinero que una persona tiene en su cartera. Si tiene, digamos, 500 bolívares, no podríamos afirmar que esta cantidad está dirigida hacia el Norte. Son 500 bolívares, sin ninguna relación con dirección alguna. Otros ejemplos de cantidades escalares son: la temperatura, la masa, el volumen, el tiempo, la rapidez.

Cuando mencionamos una cantidad vectorial, tal como la velocidad o la fuerza, tenemos que especificar la dirección a la cual está asociada esa cantidad. Así, cuando decimos que una lancha posee una velocidad de 50 km/h estamos suministrando una información incorrecta, al no especificar hacia dónde se mueve la lancha. Debemos decir, por ejemplo, que la lancha se mueve a una velocidad de 50 km/h hacia el Sur. Cuando alguien empuja un objeto con una fuerza dada, el objeto se mueve según la dirección de dicha fuerza, que es, por tanto, una cantidad vectorial.



La fuerza es una cantidad vectorial, pues la piedra se mueve en direcciones distintas, de acuerdo a la dirección de la fuerza aplicada.

Representación de vectores

En general, podemos decir que un vector es una abstracción matemática al cual se pueden asociar ciertas cantidades relacionadas con un fenómeno físico. A los vectores se les representa mediante flechas. Para representar un vector sobre una línea recta, basta con tomar un punto de origen en A y dibujar un segmento dirigido desde ese punto a otro cualquiera B de la recta. De esa forma, obtenemos el vector $\vec{AB}$ que va desde A hasta B, como se muestra en la fig. 3.9.

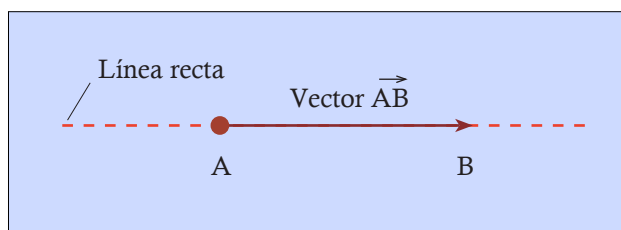


Fig. 3.9 Representación de un vector sobre una línea recta.

Un vector puede representarse sin tener como referencia ningún sistema de coordenadas. Sin embargo, para facilitar las operaciones que se realizan con vectores, es conveniente utilizar, por ejemplo, un sistema de coordenadas cartesianas, tal como se indica en la fig. 3.10. El vector $\vec{v}$ comienza en el punto A y termina en el punto B.

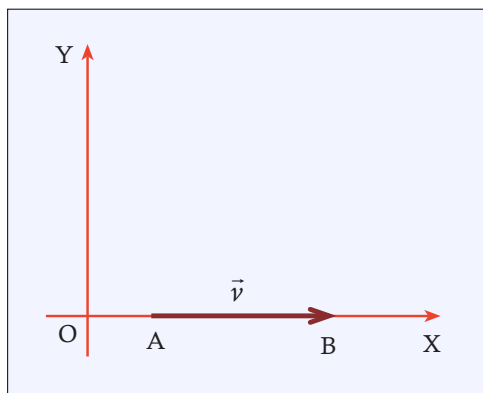


Fig. 3.10 Vector representado en un sistema de coordenadas cartesianas. Observa la flechita sobre la letra v , usada para establecer que se trata de un vector.

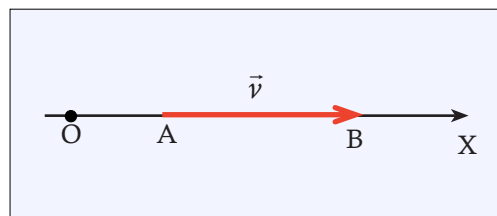


Fig. 3.11 En el movimiento rectilíneo, la velocidad puede representarse mediante un vector sobre el eje X.

Si el movimiento es rectilíneo, la velocidad puede representarse como un vector sobre el eje X, tal como se hace notar en la fig 3.11. El origen O es el origen del eje X. Los puntos a la derecha del origen tienen valores positivos, mientras que los que están a la izquierda de O, tienen valores negativos.

La representación de una cantidad vectorial se especifica mediante *el módulo* (también llamado *magnitud*) y *la dirección* del vector. La magnitud de un vector $\vec{v}$ es igual a la longitud del mismo. A la magnitud del vector $\vec{v}$ se la denota con la letra v , sin la flechita encima. La dirección de un vector que descansa sobre el eje de las X puede ser hacia la derecha o hacia la izquierda. En la fig 3.12 se muestran 2 vectores, $\vec{v}$ y $\vec{F}$. El eje X, se ha dividido en unidades iguales de longitud.

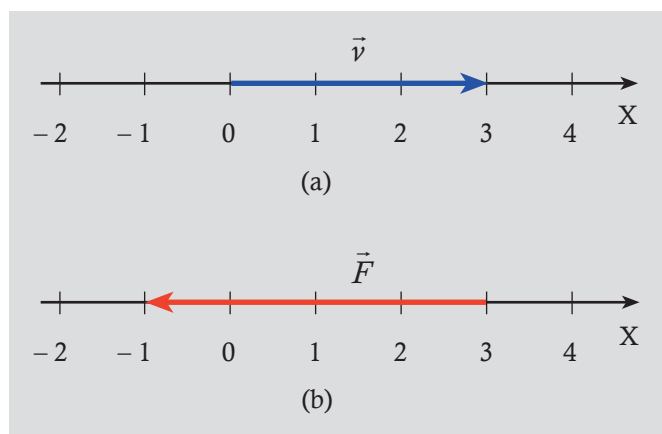


Fig. 3.12 (a) El vector $\vec{v}$ tiene una magnitud de 3 unidades y dirección hacia la derecha. (b) El vector $\vec{F}$ tiene una magnitud de 4 unidades y dirección hacia la izquierda.

El vector $\vec{v}$ tiene una magnitud de 3 unidades y dirección hacia la derecha, mientras que el vector $\vec{F}$ tiene una magnitud de 4 unidades y dirección hacia la izquierda.

Una manera simbólica de expresar la dirección de un vector sobre el eje X, es utilizar otro vector de módulo igual a 1 y que apunte en la dirección positiva o negativa del eje X. A este vector se le denomina *vector unitario* y se le representa como $\vec{i}$, si apunta hacia la derecha y como $-\vec{i}$, si apunta hacia la izquierda. Usando esta notación, los vectores $\vec{v}$ y $\vec{F}$ pueden ser expresados como:

$$\vec{v} = 3\vec{i} \qquad \vec{F} = 4(-\vec{i}) = -4\vec{i}$$

En la práctica, para determinar el factor que multiplica el vector unitario $\vec{i}$, se restan las coordenadas del extremo y del origen del vector. Así tenemos:

Vector $\vec{v}$:

Coordenada del extremo: 3

$$\Rightarrow \vec{v} = (3 - 0)\vec{i} = 3\vec{i}$$

Coordenada del origen: 0

Vector $\vec{F}$:

Coordenada del extremo: -1

$$\Rightarrow \vec{F} = (-1 - 3)\vec{i} = -4\vec{i}$$

Coordenada del origen: 3

Trayectoria, distancia y desplazamiento

Supongamos que un vehículo se traslada desde el punto A hasta el punto E, como se muestra en la fig. 3.13, y que existen dos posibles caminos para hacer el recorrido: ABCDE y AMNPQRE. A cada uno de estos caminos se denomina *trayectoria*. Entonces, podemos hablar de las trayectorias ABCDE y AMNPQRE. Si cada división de la fig. 3.13 corresponde a 1 km, la trayectoria ABCDE tiene una longitud de 7 km, mientras que la trayectoria AMNPQRE cubre una distancia de 11 km. A la longitud cubierta por el vehículo se le conoce como *distancia*. Cuando se recorre la trayectoria ABCDE se cubre una distancia de 7 km, mientras que en la trayectoria AMNPQRE se cubre una distancia de 11 km.

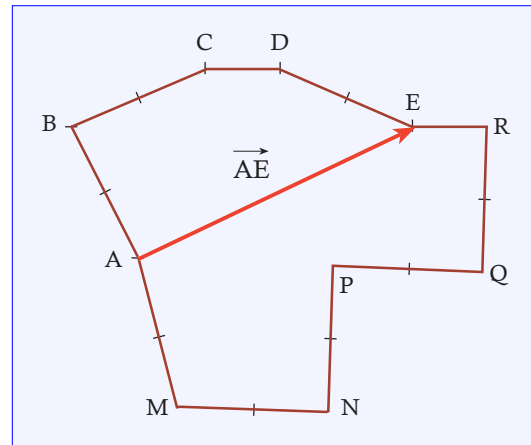


Fig. 3.13 Trayectoria y distancia.

Indudablemente, desde el punto A hasta el punto E hay infinitas trayectorias, de las cuales una de ellas corresponde a la distancia más corta. Al vector entre los puntos A y E, correspondiente a esa distancia más corta y denotada en la fig. 3.13 como $\vec{AB}$, se le conoce como *vector desplazamiento*.

Ejemplo 3.6

En la fig. 3.14 una hormiga parte del punto O, recorre 60 cm hasta el punto P y, luego, se devuelve 20 cm hasta el punto M. a) ¿Cuál es la distancia recorrida? b) ¿Cuál es el vector desplazamiento?

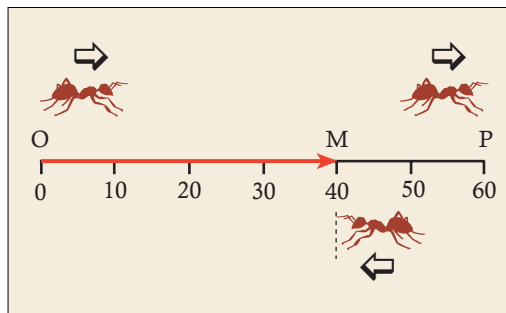


Fig. 3.14 Ejemplo 3.6.

Solución

a) La distancia recorrida está dada por:

$$d = OP + PM = 60 + 20 = 80 \text{ cm}$$

b) El vector desplazamiento corresponde a $\vec{OM}$, cuyo módulo es 40 cm y está dirigido hacia la derecha:

$$\vec{OM} = 40\vec{i}$$

Velocidad Media

La velocidad es una cantidad vectorial que indica el cambio de posición de un objeto (desplazamiento) en un intervalo de tiempo dado. Considera un objeto que se mueve en línea recta desde la posición inicial x_i hasta la posición final x_f , como se indica en la fig 3.15. La velocidad media se define como:

$$\vec{V}_m = \frac{(x_f - x_i)}{\Delta t} \vec{i} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} \quad (3.5)$$

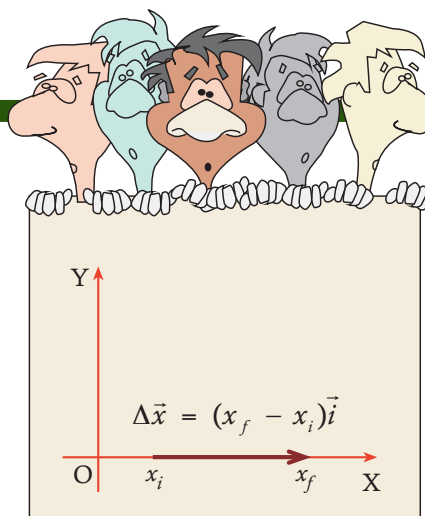


Fig. 3.15 La velocidad media es la relación entre el vector desplazamiento $\Delta \vec{x}$ y el intervalo de tiempo Δt .

donde:

x_i : coordenada de la posición inicial.

x_f : coordenada de la posición final

Δt : intervalo de tiempo entre la posición inicial hasta la final.

$\Delta \vec{x} = (x_f - x_i)\vec{i}$: vector desplazamiento entre x_i y x_f

El vector desplazamiento tiene como módulo a la distancia $\Delta x = x_f - x_i$ y su dirección, indicada por el vector unitario $\vec{i}$, puede ser hacia la derecha o hacia la izquierda, dependiendo de los valores de x_f y x_i . La relación (3.5) puede escribirse como:

$$\vec{V}_m = V_m \vec{i} \quad (3.6)$$

Donde V_m (sin la flechita de vector encima) es la magnitud de $\vec{V}_m$ dada por:

$$V_m = \frac{x_f - x_i}{\Delta t} \quad (3.7)$$

Como lo indica la relación anterior, la velocidad media, al igual que la rapidez, se expresa en unidades de longitud divididas por unidades de tiempo.

Ejemplo 3.7

Un jugador de bolas criollas lanza una bola y, al cabo de 2 segundos, ésta ha recorrido 1 m, en tanto que al cabo de 5 segundos la bola se encuentra a 12 m del jugador. a) ¿Cuál es la rapidez media y la velocidad media durante todo el recorrido? b) ¿Cuál es la velocidad media entre $t = 2$ s y $t = 5$ s? En la fig. 3.16 se ilustra la situación.

Solución

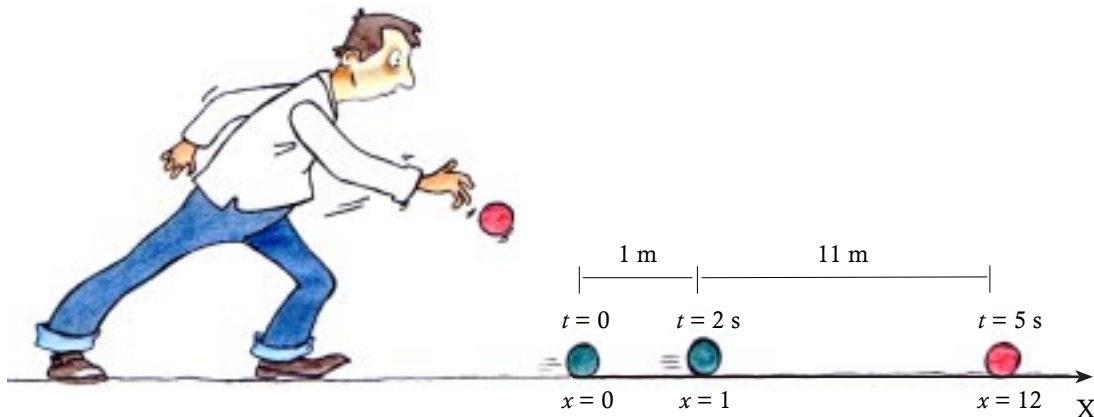


Fig. 3.16 Ejemplo 3.7.

El eje X se ha dibujado a lo largo de la trayectoria de la bola lanzada.

a) Durante toda la trayectoria la distancia recorrida es de 12 metros. Luego, la rapidez media es:

$$V_m = \frac{12 \text{ m}}{5 \text{ s}} = 2,4 \text{ m/s}$$

Para determinar la velocidad media, establecemos primero los valores de Δx y Δt :

$$\Delta x = x_f - x_i = 12 - 0 = 12 \text{ m} \Rightarrow \Delta \vec{x} = 12\vec{i} \text{ m}$$

$$\Delta t = 5 - 0 = 5 \text{ s}$$

Por tanto:

$$\vec{V}_m = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} = \frac{12}{5} \vec{i} \text{ m/s} = 2,4\vec{i} \text{ m/s}$$

donde el vector unitario $\vec{i}$ indica que la bola se mueve hacia la derecha. Observa que el módulo de la velocidad media es igual a la rapidez media.

b) Para este caso se tiene:

$$\Delta \vec{x} = (12 - 1)\vec{i} = 11\vec{i} \text{ m} \quad \Delta t = 5 - 2 = 3 \text{ s}$$

Luego:

$$\vec{V}_m = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} = \frac{11}{3}\vec{i} \text{ m} = 3,67\vec{i} \text{ m}$$

Ejemplo 3.8

Un corredor parte del punto A en el campo deportivo rectangular de la fig 3.17, hace todo el recorrido y regresa al punto A en 60 segundos. Determina su rapidez media y su velocidad media.

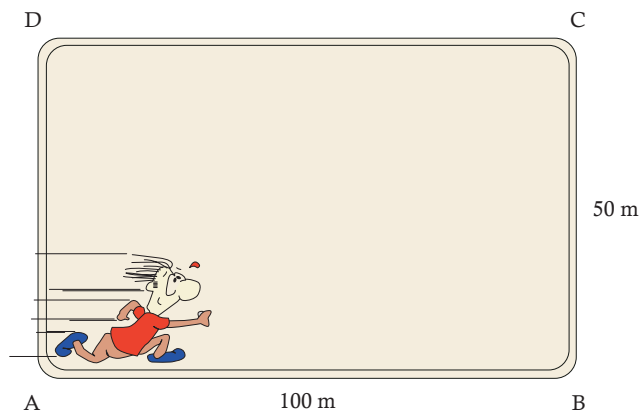


Fig. 3.17 Ejemplo 3.8.

Solución

La distancia total recorrida es $d = 100 + 50 + 100 + 50 = 300$ m. La rapidez media es:

$$V_m = \frac{300 \text{ m}}{60 \text{ s}} = 5 \text{ m/s}$$

Dado que al regresar al punto A el desplazamiento es igual a cero, la velocidad media es también igual a cero.

Velocidad Uniforme

Consideremos la fig. 3.18, donde un automóvil se desplaza en línea recta a lo largo de una autopista.

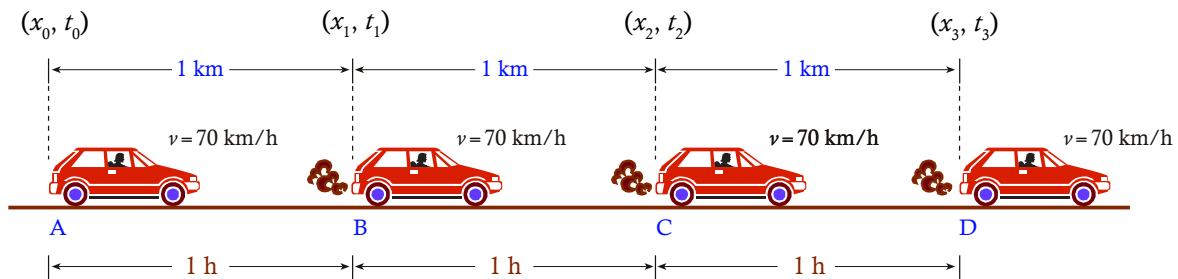


Fig. 3.18 Si el automóvil conserva su velocidad a lo largo del recorrido, su velocidad es uniforme o constante.

Se dice que la velocidad del automóvil es *uniforme* o *constante* si en todo momento permanece igual; es decir, tiene la misma magnitud y dirección a lo largo de su recorrido. Entonces, si el vehículo de la fig. 3.18 tiene en el punto A una velocidad de $70\vec{i}$ km/h, en los puntos B, C y D y en cualquier otro punto de su trayectoria, su velocidad será de $70\vec{i}$ km/h. Esto puede expresarse como:

$$\vec{V}_A = \vec{V}_B = \vec{V}_C = \vec{V}_D = \dots = 70\vec{i} \text{ km/h} \quad (\text{A lo largo de la trayectoria})$$

Por supuesto, los módulos de las velocidades en cualquier punto son:

$$V_A = V_B = V_C = V_D = \dots = 70 \text{ km/h} \quad (\text{A lo largo de la trayectoria})$$

Un objeto con velocidad uniforme recorre distancias iguales en intervalos de tiempos iguales. Así, por ejemplo, si el vehículo de la fig. 3.18 tiene una velocidad de 70 km/h hacia la derecha,

cada hora recorrerá 70 km en esa dirección. En realidad, la velocidad media es también una velocidad constante cuando nos referimos al movimiento rectilíneo uniforme. Demostraremos, mediante la fig. 3.18, que esto es así. Si $\vec{V}_{m_1}$, $\vec{V}_{m_2}$, y $\vec{V}_{m_3}$ son las velocidades medias entre los puntos A-B, B-C y C-D, respectivamente, podemos escribir:

$$\vec{V}_{m_1} = \frac{x_1 - x_0}{t_1 - t_0} \vec{i} \quad \vec{V}_{m_2} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \vec{i} \quad \vec{V}_{m_3} = \frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_2} \vec{i}$$

Si las distancias y los intervalos de tiempo son iguales, tendremos:

$$\begin{aligned} x_1 - x_0 &= \Delta x & x_2 - x_1 &= \Delta x & x_3 - x_2 &= \Delta x \\ t_1 - t_0 &= \Delta t & t_2 - t_1 &= \Delta t & t_3 - t_2 &= \Delta t \end{aligned}$$

Entonces:

$$\vec{V}_{m_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \vec{i} \quad \vec{V}_{m_2} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \vec{i} \quad \vec{V}_{m_3} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \vec{i}$$

De donde concluimos que:

$$\vec{V}_{m_1} = \vec{V}_{m_2} = \vec{V}_{m_3} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \vec{i} = \vec{V} = \text{constante}$$

Luego, en el movimiento rectilíneo uniforme, la velocidad puede escribirse como:

$$\vec{V} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \vec{i} \quad (3.8)$$

En general:

$$\Delta x = x_f - x_i \quad \Delta t = t_f - t_i \quad (3.9)$$

Donde x_f y t_f corresponden a las coordenadas del punto final y a la lectura final del intervalo de tiempo, mientras que x_i y t_i corresponden a las coordenadas del punto inicial y a la lectura del tiempo inicial, cuando comenzó a medirse el movimiento. El módulo de (3.8) es $V = \Delta x / \Delta t$ que, usando (3.9), puede expresarse de la manera siguiente:

$$V = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow V = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i}$$

De donde podemos obtener las siguientes relaciones:

$$x_f - x_i = (t_f - t_i)V \Rightarrow x_f = x_i + (t_f - t_i)V \quad (3.10)$$

$$\Rightarrow t_f - t_i = \frac{x_f - x_i}{V} \quad (3.11)$$

La expresión (3.10) permite determinar la coordenada final de un objeto, conocida su posición inicial, el módulo de su velocidad y el tiempo transcurrido hasta su posición final. La expresión (3.11) permite determinar el tiempo transcurrido para cubrir la distancia $x_f - x_i$ a una velocidad V . A menudo, se comienza a hacer las mediciones de distancia y tiempo a partir de $x_i = 0$, $t_i = 0$, con lo cual las relaciones (3.12) y (3.13) se convierten en:

$$x_f = t_f V \quad (3.12)$$

$$t_f = \frac{x_f}{V} \quad (3.13)$$

Ejemplo 3.9

Con frecuencia, se comenta que los tiburones tienen poca visión y que se mueven a velocidades muy altas. En realidad, los ojos de los tiburones son capaces de distinguir colores, tienen una visión hasta 7 veces mayor que la de un ser humano y algunas especies de tiburones son capaces de detectar señales visuales hasta 10 veces más débiles, respecto de las que una persona promedio puede ver. En cuanto a la velocidad, la mayoría de los tiburones nadan lentamente, a velocidad de unos 2,6 m/s, aun cuando en momentos de agitación pueden llegar a desarrollar más de 10 m/s. En la fig 3.19 dos tiburones detectan, simultáneamente, una presa. El tiburón A se mueve a una velocidad de 3 m/s, mientras que el tiburón B se mueve a 1,5 m/s. ¿Cuál atrapará primero la presa?

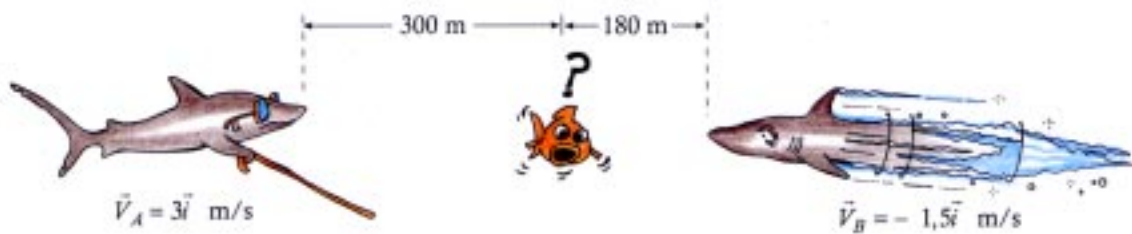


Fig. 3.19 ¿Cuál tiburón atrapará primero la presa? Ejemplo 3.9.

Solución

El tiempo que tarda el tiburón A en llegar a la presa es:

$$t_A = \frac{300 \text{ m}}{3 \text{ m/s}} = 100 \text{ s} \quad (1 \text{ minuto y } 40 \text{ segundos})$$

El tiempo que tarda el tiburón B en llegar a la presa es:

$$t_B = \frac{180 \text{ m}}{1,5 \text{ m/s}} = 120 \text{ s (2 minutos)}$$

Entonces, el tiburón B tendrá que esperar otra oportunidad.

Ejemplo 3.10

El nudo es una unidad de rapidez usada con frecuencia en el argot marítimo y en el aéreo. Un nudo equivale a 1 milla náutica por hora o a 1,852 km/h. Para viajar a la Isla de Margarita desde Cumaná, un turista puede abordar una lancha que, normalmente, se mueve a una velocidad de 16 nudos o un ferry que navega a una velocidad de 8 nudos. Esas velocidades (módulo y dirección) permanecen aproximadamente constantes durante la travesía. En la fig. 3.20 se muestran un ferry y una lancha de pasajeros que zarpan hacia Margarita desde Cumaná. El ferry parte 30 minutos antes que la lancha. La distancia entre ambas localidades es de 32 millas náuticas. a) ¿Cuánto tarda cada nave en alcanzar su destino? b) ¿Cuándo y a qué distancia de Cumaná alcanza la lancha al ferry?

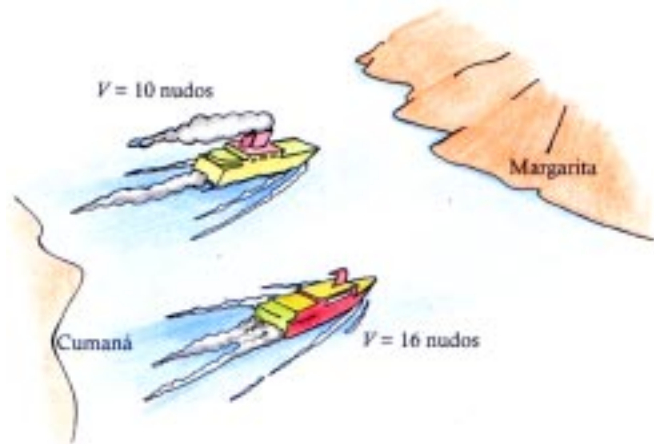


Fig. 3.20 Ejemplo 3.10.

Solución

a) Si asumimos que ambas embarcaciones navegan en línea recta, según el eje de las X, podemos omitir la notación vectorial asociada con el vector unitario $\vec{i}$. Los tiempos de viaje del ferry y la lancha son:

$$t_f = \frac{\text{Distancia a Margarita}}{\text{Velocidad del ferry}} = \frac{32 \text{ millas náuticas}}{8 \text{ millas náuticas/h}} = 4 \text{ h}$$

$$t_l = \frac{\text{Distancia a Margarita}}{\text{Velocidad de la lancha}} = \frac{32 \text{ millas náuticas}}{16 \text{ millas náuticas/h}} = 2 \text{ horas}$$

b) En el instante cuando la lancha pasa al ferry, las distancias recorridas por ambas embarcaciones son iguales y podemos escribir:

$$d_f = d_l \quad \Rightarrow \quad V_f t_f = V_l t_l \quad (3.14)$$

Como la velocidad de la lancha es mayor que la del ferry ($V_l > V_f$), el tiempo de viaje de la lancha, en el momento cuando pasa al ferry, es menor que el tiempo de viaje del ferry ($t_l < t_f$). Es decir, el tiempo de viaje de la lancha puede expresarse como:

$$t_l < t_f \quad \Rightarrow \quad t_l = t_f - a$$

Donde a representa el retardo entre las dos naves, en este caso igual a 0,5 horas. Luego:

$$t_l = t_f - 0,5 \quad \Rightarrow \quad t_f = t_l + 0,5 \quad (3.15)$$

Sustituyendo (3.15) en (3.14):

$$V_f(t_l + 0,5) = V_l t_l \quad (3.16)$$

A fin de obtener t_l efectuamos operaciones:

$$V_f t_l + 0,5 V_f = V_l t_l \quad \Rightarrow \quad V_l t_l - V_f t_l = 0,5 V_f$$

Usando los valores dados, el tiempo que tarda la lancha en alcanzar al ferry es:

$$t_l = \frac{0,5 V_f}{V_l - V_f} \quad \Rightarrow \quad t_l = \frac{0,5 \cdot 8 \text{ nudos}}{16 \text{ nudos} - 8 \text{ nudos}} = \frac{4 \text{ nudos h}}{8 \text{ nudos}} = 0,5 \text{ h}$$

El tiempo de viaje del ferry, cuando es alcanzado por la lancha, está dado por (3.15):

$$t_f = t_l + 0,5 = 1 \text{ h}$$

Observa que el resultado anterior pudo determinarse fácilmente, tomando en cuenta que la velocidad de la lancha es el doble de la velocidad del ferry. La distancia recorrida por la lancha cuando alcanza al ferry es:

$$d_l = V_l t_l = 16 \cdot 1,852 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 0,5 \text{ h} = 14,82 \text{ km}$$

Ejemplo 3.11

De acuerdo con la teoría del desplazamiento de las placas tectónicas, hace muchos años Sudamérica y África estaban unidas. Estos dos continentes se separaron a una velocidad de 4 centímetros por año. Si los puntos de referencia en esos continentes se encuentran actualmente a 8.000 km, ¿qué tiempo transcurrió para alcanzar esa distancia?

Solución

La velocidad de separación es de 4 cm/año. Para reducir a km multiplicamos por 10^{-5} para obtener:

$$V_{\text{Separación}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ km/año}$$

Como la distancia entre los dos continentes es de 8.000 km, el tiempo transcurrido hasta la actualidad es:

$$t = \frac{8.000 \text{ km}}{4 \cdot 10^{-5} \text{ km/año}} = 2.000 \cdot 10^5 = 200.000.000 \text{ años}$$

Es decir, han pasado ¡200 millones de años!

Velocidad Instantánea

La velocidad instantánea nos indica cuán rápido y en qué dirección un objeto se mueve *en cada instante de tiempo*. A la velocidad instantánea la denotaremos mediante el vector $\vec{v}$. En la fig. 3.21 el vehículo se mueve en una trayectoria de segmentos rectilíneos.

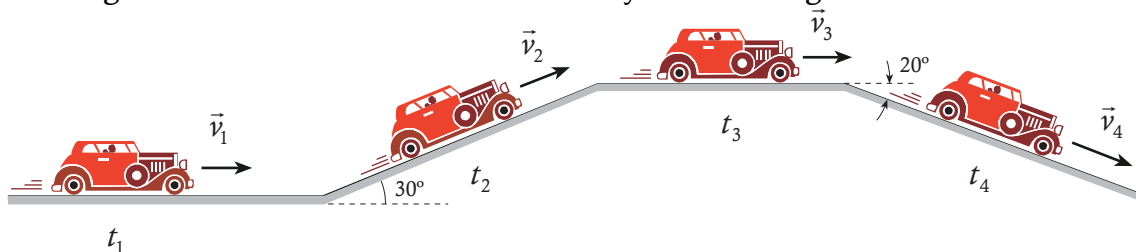


Fig. 3.21 La velocidad instantánea indica la rapidez y la dirección del vehículo en cada momento.

En los instantes de tiempo t_1 , t_2 , t_3 y t_4 las velocidades instantáneas del vehículo son v_1 (dirección hacia la derecha), v_2 (dirección hacia arriba 30°), v_3 (dirección hacia la derecha) y v_4 (dirección hacia abajo 20°). Si el velocímetro del automóvil marca en el instante t_1 , 100 km/h, su velocidad podemos expresarla como:

$$\vec{v}_1 = 100\vec{i} \text{ km/h}$$

Si la velocidad de un móvil es uniforme, (constante) entonces su velocidad instantánea es también igual a esa constante. Si la velocidad uniforme es denotada por $\vec{V}$ y la instantánea por $\vec{v}$, podemos escribir:

$$\vec{V} = \vec{v}$$

Si el movimiento es rectilíneo y en una misma dirección, por ejemplo en la dirección X positiva, tendremos:

$$\vec{V} = V\vec{i} \quad \vec{v} = v\vec{i} \quad \Rightarrow \quad V\vec{i} = v\vec{i} \quad \Rightarrow \quad V = v$$

Lo que indica que los módulos son iguales



PIENSA Y EXPLICA



- 3.26** Un electrón rota alrededor del núcleo de un átomo con rapidez constante. ¿Es su velocidad constante?
- 3.27** Si la velocidad de un objeto es constante, su rapidez es: **a)** ¿Menor que la magnitud de la velocidad **b)** ¿Mayor que la magnitud de la velocidad. **c)** ¿Igual que la magnitud de la velocidad?
- 3.28** La velocidad de la luz es constante. ¿Cuál es su magnitud? ¿Cuál es su dirección?
- 3.29** ¿Cuál es la diferencia entre una cantidad escalar y una vectorial? Cita 4 ejemplos de cantidades escalares. Cita 5 ejemplos de cantidades vectoriales.
- 3.30** ¿Por qué es conveniente tener un sistema de coordenadas para representar un vector? ¿Cuáles son los atributos de un vector?
- 3.31** Alguien dice: “además de la magnitud y dirección es importante especificar el color de un vector”. ¿Puede tener eso relevancia?
- 3.32** ¿Qué es un vector unitario? ¿Qué es un vector unitario en la dirección positiva del eje X y cómo se representa simbólicamente? ¿Cómo se representa un vector unitario en la dirección negativa del eje X? ¿Cómo se obtiene la expresión de un vector cualquiera sobre el eje X?
- 3.33** ¿Cuál es la diferencia entre trayectoria, distancia y desplazamiento? ¿En qué unidades se miden la trayectoria, la distancia y el desplazamiento? ¿Cómo se determina el vector desplazamiento?
- 3.34** Define la velocidad media. ¿Qué diferencia hay entre rapidez media y velocidad media? Escribe la fórmula para velocidad media y explica detalladamente los componentes de la misma. ¿En qué unidades se expresa la velocidad media? ¿Bajo qué condiciones la velocidad media puede resultar igual a cero? ¿Cuándo la velocidad es uniforme o constante?

- 3.35** ¿Cuándo es el movimiento rectilíneo y uniforme? Cita ejemplos de fenómenos físicos donde la velocidad sea uniforme.
- 3.36** En la naturaleza, todo es movimiento: se mueven los árboles, los animales, el viento, las olas del mar, los astros, las ondas de sonido, la sangre de los seres vivos, los átomos ...y parece de contar ¿Es el movimiento rectilíneo uniforme una excepción o un fenómeno general?
- 3.37** ¿Tienen los árboles velocidad de crecimiento? Si tu respuesta es afirmativa, averigua y piensa sobre su módulo y dirección.
- 3.38** ¿Es verdad que los tiburones tienen una pobre visión y que nadan a velocidades muy altas? ¿Quién es más veloz, un delfín o un tiburón?
- 3.39** En el argot marítimo, ¿qué significa una velocidad de un nudo? ¿Qué es una milla náutica y cuál es su equivalencia en kilómetros?
- 3.40** Investiga cuál es la velocidad de despegue de un avión cuando comienza a alzar el vuelo.
- 3.41** Define la velocidad instantánea. En un vehículo en movimiento, ¿qué instrumento del mismo mide la magnitud de la velocidad instantánea? ¿Qué instrumento podría usarse para medir la dirección instantánea?
- 3.42** Si un avión vuela a una velocidad constante de 300 km/h, ¿cuál es su velocidad instantánea?
- 3.43** ¿Crees que los conceptos de velocidad media y velocidad instantánea se aplican sólo al movimiento rectilíneo uniforme?
- 3.44** ¿Es conveniente expresar la velocidad de vuelo de una mariposa como una velocidad instantánea? ¿Qué dificultades podrías tener?
- 3.45** ¿Qué mide el velocímetro de un automóvil: la velocidad, la rapidez o ambas cantidades?



PROBLEMAS



3.8 Expresa los vectores de la fig. 3.22 mediante su magnitud y dirección.

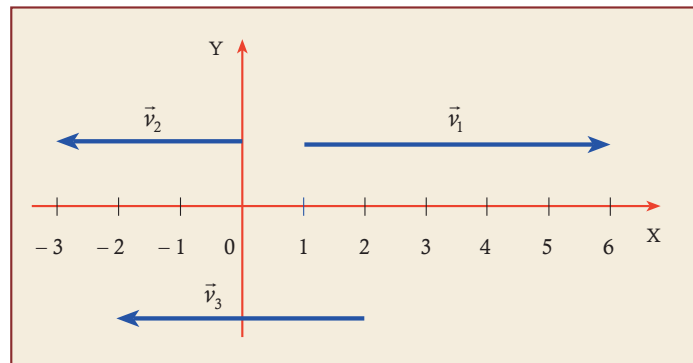


Fig. 3.22 Problema 3.8.

3.9 Expresa las siguientes cantidades vectoriales con su magnitud y dirección:
a) Una velocidad de 8 m/s dirigida hacia la derecha. **b)** Una velocidad de 5 km/h dirigida hacia la izquierda. **c)** Una velocidad de 40 m/s dirigida hacia arriba. **d)** Una velocidad de 10 cm/min dirigida hacia abajo.

3.10 En la fig. 3.23 un corredor parte del punto A y llega al punto B. Cada cuadra tiene 100 m de largo y el ancho de las calles es de 12 m. El ciclista se desplaza por el centro de la calle durante todo el recorrido. **a)** Determina la distancia total recorrida y la expresión para el vector desplazamiento. **b)** Si el recorrido desde A hasta B dura 6 minutos ¿Cuáles son la rapidez y la velocidad promedio?

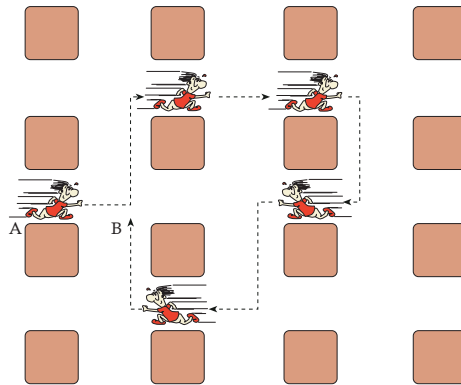


Fig. 3.23 Problema 3.10.

3.11 El tiempo de parpadeo de un ser humano es de , aproximadamente, 0,2 segundos. Una persona observa a un pájaro que vuela a una velocidad de 50 millas/horas, ¿Qué distancia recorre el pájaro durante un parpadeo?

- 3.12** En un maratón, la última parte de la carrera corresponde a una distancia de 200 metros planos, en línea recta. El corredor A, que va adelante, mantiene una velocidad constante de 3 m/s. El maratonista B que le sigue, sostiene una velocidad constante de 3,5 m/s. a) ¿Quién llega primero a la meta? b) ¿Alcanza el maratonista B al maratonista A antes de llegar a la meta? ¿A qué distancia de la meta? Ver fig. 3.24.

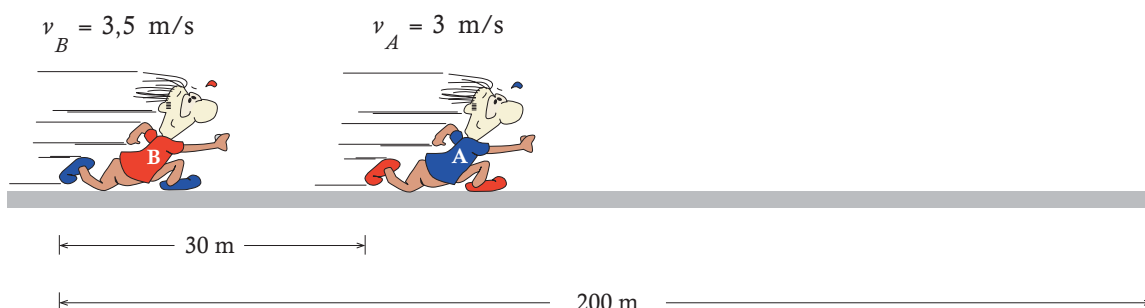


Fig. 3.24 ¿Alcanza el maratonista B al A? Problema 3.12.

- 3.13** Un delfín es entrenado para que transporte una pelota desde un extremo A de una piscina de 100 m hasta un punto B situado a 40 m de ese extremo A. El recorrido desde A hasta B lo hace con una rapidez uniforme de 4 m/s. En el punto B se detiene 30 segundos para ser alimentado, en recompensa por su trabajo. Luego, se dirige al final de la piscina (punto C) con la misma rapidez anterior y, finalmente, regresa al punto de partida (A) con una rapidez constante de 3 m/s. ¿Cuáles fueron su rapidez media y su velocidad media?
- 3.14** Para calcular el número de vehículos que pasan por una intersección de una calle de un solo canal, se tienen los siguientes datos: la rapidez media es de 45 km/h, la distancia promedio entre vehículos es de 20 m y la longitud media de los mismos es de 5 m. Con esas cantidades conocidas determina el número de vehículos por hora en la intersección.
- 3.15** Dos vehículos se acercan entre sí en una autopista recta, a velocidades uniformes de módulos iguales a 70 km/h y 80 km/h. Si inicialmente estaban separados 10 km, ¿cuánto tardarán en encontrarse?
- 3.16** Un conductor, que maneja su vehículo a 120 km/h, mira durante 2 segundos por el espejo retrovisor. ¿Qué distancia recorrió su vehículo en ese tiempo?

CAPÍTULO 4



Movimiento Rectilíneo. Gráficos.

4.1 GRÁFICO DE DISTANCIA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

En el estudio de la Física es de suma importancia la representación gráfica de los conceptos involucrados en la descripción de los fenómenos físicos. Este esfuerzo a menudo conduce, siempre que sea posible, a facilitar las discusiones en el ámbito del salón de clases y a aclarar los conceptos teóricos que surgen en el desarrollo de la Física como ciencia.

Lo dicho anteriormente es aplicable al movimiento en general, pero en este capítulo veremos qué tipos de diagramas se utilizan para representar el *movimiento rectilíneo uniforme*, bajo cuyo esquema un cuerpo se mueve en línea recta y a velocidad constante. A continuación consideramos varios casos, en los cuales se relaciona la recta real orientada, con la posición que ocupa un objeto en movimiento.

- a. **El móvil se encuentra en la posición $x_i = 0$, cuando comienza la observación ($t_i = 0$) y se aleja del origen.**

Considera un vehículo que se mueve en línea recta con rapidez constante e igual a 10 m/s, como se muestra en la fig. 4.1. Cada segundo el vehículo recorre 10 m.

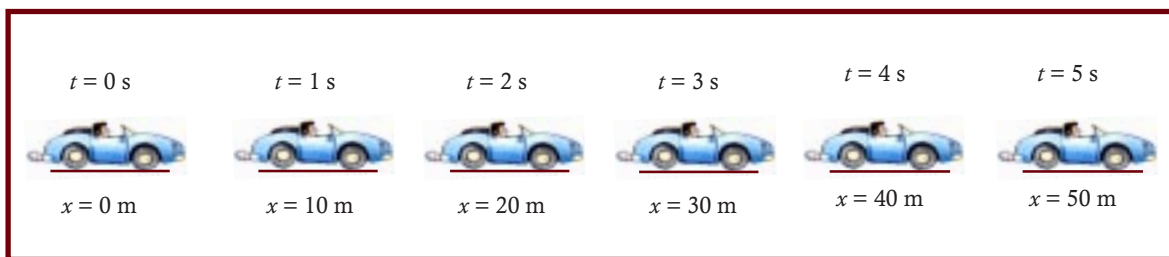


Fig. 4.1 El vehículo de la figura tiene una rapidez de 10 m/s; es decir, recorre 10 m en cada segundo.

De acuerdo con lo estudiado en el capítulo anterior, la relación general que describe el movimiento rectilíneo uniforme es:

$$V = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow V = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} \quad (4.1)$$

Para el caso que nos ocupa, $x_i = 0$ cuando $t_i = 0$ y la relación (4.1) se convierte en:



$$V = \frac{x_f}{t_f} \Rightarrow x_f = Vt_f \quad (4.2)$$

En las relaciones anteriores, x_f y t_f se refieren a la posición final que ocupa el móvil y al tiempo final del recorrido y x_i y t_i se refieren a la posición inicial y al tiempo inicial, cuando se comienza a hacer la observación. La tabla 4.1. da los valores de las posiciones ocupadas, en función del tiempo empleado.

$t(s)$	0	1	2	3	4	5
$x(m)$	0	10	20	30	40	50

Tabla 4.1.

Un hombre, usualmente, camina con una rapidez de 1 a 2 m/s. En la carrera de 100 m planos, la máxima rapidez alcanzada por un hombre está cercana a 11 m/s.

Si se hace un gráfico de la posición contra el tiempo se obtiene la fig. 4.2. Como puedes observar, la representación gráfica de este movimiento corresponde a una línea recta que pasa por el origen. De acuerdo con esto, podemos afirmar:

La representación gráfica de un movimiento rectilíneo uniforme, con condiciones iniciales nulas ($t_i = 0$, $x_i = 0$), es una línea recta que pasa por el origen.

De acuerdo con la relación (4.1), la rapidez del vehículo puede determinarse dividiendo cualquier incremento de distancia, Δx , entre el correspondiente intervalo de tiempo, Δt . De la fig. 4.2, podemos ver que para un intervalo $\Delta t = 1$ s, $\Delta x = 10$ m y, por tanto:

$$V_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{10 \text{ m}}{1 \text{ s}} = 10 \text{ m/s}$$

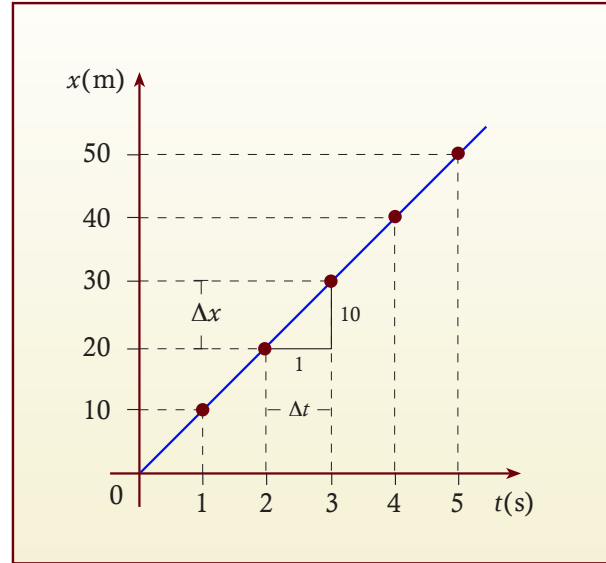


Fig. 4.2 Gráfico correspondiente al movimiento de la tabla 4.1.

Ahora bien, en la fig. 4.2 observamos que la pendiente de la línea recta corresponde al valor de la rapidez. Esta pendiente es la misma, independientemente de los puntos seleccionados para medirla. En general, podemos decir:

En el movimiento rectilíneo uniforme la pendiente del gráfico $x - t$ es igual al valor de la rapidez.

En el ejemplo que estamos tratando $V_m = V = 10$ m/s y la relación (4.2) podemos escribirla de la siguiente manera:

$$x_f = 10 t_f$$

Como ya sabes de tus estudios anteriores, la relación anterior corresponde a una función afín que pasa por el origen y, para representarla en el plano $x - t$, la expresamos como:

$$x = 10 t \quad (4.3)$$

Ejemplo 4.1

En la fig. 4.3 se muestra un gráfico del desplazamiento de un móvil, en función del tiempo. a) ¿Cuál es la rapidez del móvil? b) ¿Qué distancia ha recorrido cuando han transcurrido 2 horas?

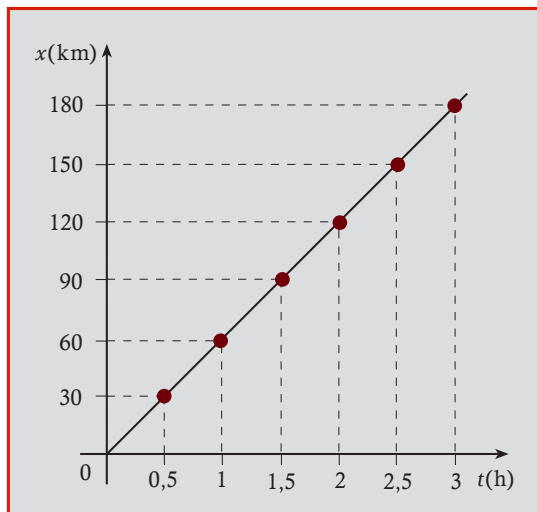


Fig. 4.3 Gráfico para el ejemplo 4.1.

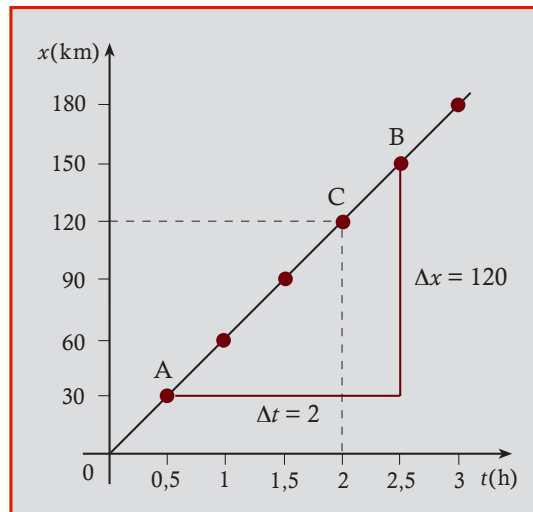


Fig. 4.4 Determinación gráfica de la rapidez del móvil del ejemplo 4.1

Solución

a) Para determinar la rapidez del móvil, calculamos la pendiente de la recta, según la fig 4.4. Para ello, tomamos los puntos A y B sobre la recta (en realidad pueden ser tomados 2 puntos cualesquiera). Para esos puntos se tiene:

$$\begin{array}{lll} \text{Punto A:} & x = 30 & t = 0,5 \\ \text{Punto B:} & x = 150 & t = 2,5 \end{array}$$

Los valores de Δx y Δt son:

$$\Delta x = 150 - 30 = 120 \text{ km} \qquad \Delta t = 2,5 - 0,5 = 2 \text{ h}$$

Luego

$$V_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{120 \text{ km}}{2 \text{ h}} = 60 \text{ km/h}$$

b) Del gráfico $x - t$ de la fig. 4.4 se observa que para $t = 2 \text{ h}$, la distancia recorrida es de 120 km. Esto corresponde al punto C sobre la recta.

b. El móvil se aleja del origen y se encuentra a una distancia $x_i = 0$ cuando comienza la observación.

En la fig. 4.5 se muestra esta situación. El automóvil se encuentra a una distancia de 10 m cuando comienza la observación ($t = 0$).

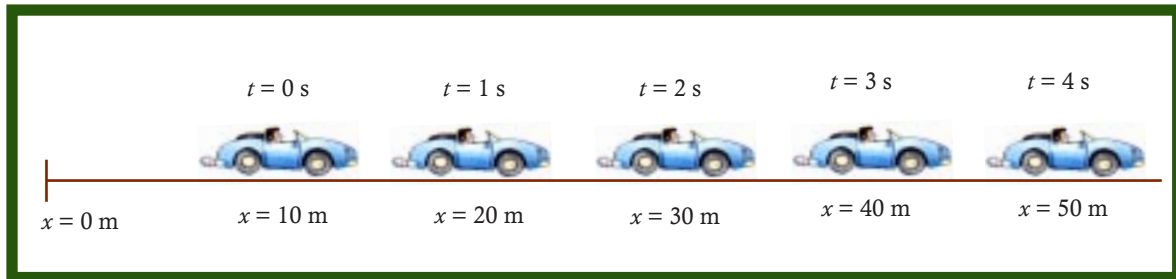


Fig. 4.5 El automóvil se encuentra a una distancia $x = 10$ m cuando se comienza a hacer la observación y se aleja del origen.

En la tabla 4.2 se presenta cómo varía la distancia recorrida por el automóvil con el tiempo y en la fig. 4.6 se muestra el gráfico correspondiente:

t (s)	0	1	2	3	4
x (m)	10	20	30	40	50

Tabla 4.2.

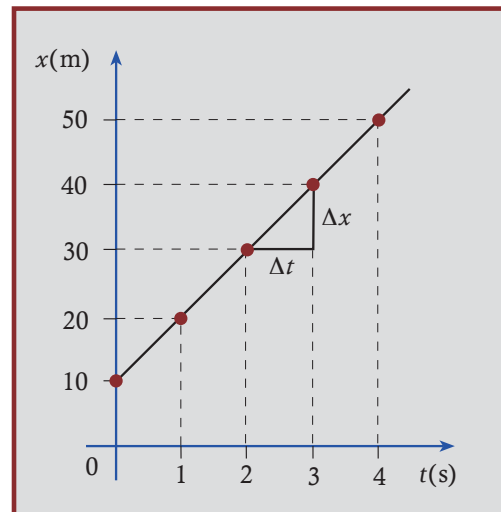


Fig. 4.6 Gráfico del vehículo de la fig. 4.5. La línea recta no comienza en el origen.

Como puede deducirse del gráfico, la línea recta no comienza en el origen, ya que para $t = 0$ s, $x = 10$ m. La rapidez del automóvil se obtiene como en el caso anterior, determinando la pendiente de la recta:

$$V_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{(40 - 30) \text{ m}}{(3 - 2) \text{ s}} = 10 \text{ m/s}$$

La función lineal que describe el movimiento puede obtenerse de la relación (4.1). En efecto:

$$V_m = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} \Rightarrow x_f - x_i = V_m(t_f - t_i)$$

Si x_f es la distancia en cualquier momento, t_f , en relación al origen, podemos sustituir x_f por x y t_f por t . Así, la relación anterior nos queda como:

$$x - x_i = V_m(t - t_i) \Rightarrow x = x_i + V_m(t - t_i)$$

Cuando $t_i = 0$ y $x_i = 10$, tenemos:

$$x = 10 + 10 t \quad (4.4)$$

ecuación que describe el movimiento del vehículo de la fig. 4.5. Esto significa que si damos valores al tiempo t , calculamos los valores de x , y hacemos el gráfico correspondiente, obtenemos exactamente la línea recta de la fig. 4.6.



Un delfín nada con una rapidez cuyo valor está entre 3 y 5 m/s. Cuando se desplaza, saltando por encima del agua, supera 7 m/s.

c. El móvil parte del origen, se aleja del mismo y, luego, se detiene por un tiempo.

Considera un automóvil en movimiento con una rapidez constante de 50 km/h. En la fig. 4.7 se muestra la distancia recorrida por el mismo. Al llegar a los 100 km, el automóvil se detiene durante 1 hora.

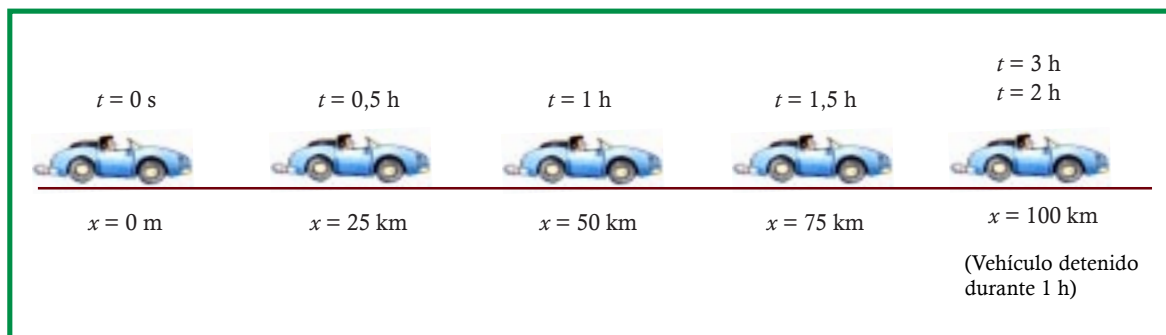


Fig. 4.7 El automóvil recorre 50 km cada hora. En $x = 100 \text{ km}$, se detiene durante 1 hora.

En la tabla 4.3 se indica cómo varía la posición del vehículo con el tiempo.

t (h)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
x (km)	0	25	50	75	100	100	100

Tabla 4.3.

De la tabla 4.3, se deduce que el vehículo se detiene al alcanzar 100 km y permanece inmóvil (la posición no varía) entre $t = 2$ h y $t = 3$ h, como se ilustra en el segmento AB del gráfico $x - t$ de la fig. 4.8.

El automóvil se mueve entre $t = 0$ y $t = 2$ h a una velocidad constante, cuyo módulo está dado por la pendiente de la recta:

$$V_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{25 \text{ km}}{0,5 \text{ h}} = 50 \text{ km/h}$$

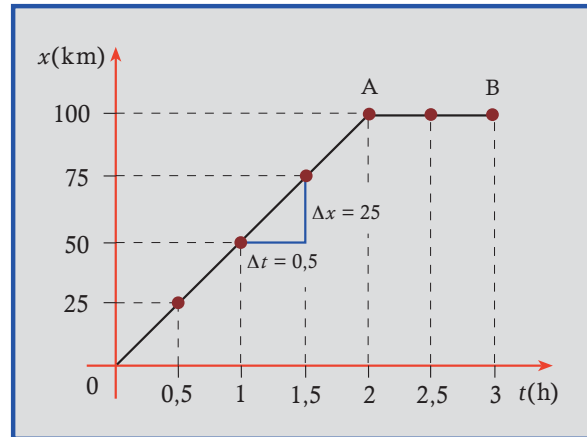


Fig. 4.8 Gráfico del movimiento del vehículo de la fig. 4.7. El móvil está detenido entre $t = 2$ h y $t = 3$ h.

Al llegar a los 100 km (punto A), el vehículo se detiene en A y permanece parado durante el intervalo de tiempo entre $t = 2$ h y $t = 3$ h. En ese intervalo, la distancia es igual a 100 km. Es decir, la línea horizontal entre A y B sin cambio en x por 1 hora, muestra que el vehículo se detuvo durante ese tiempo y, por tanto, no cambió de posición.

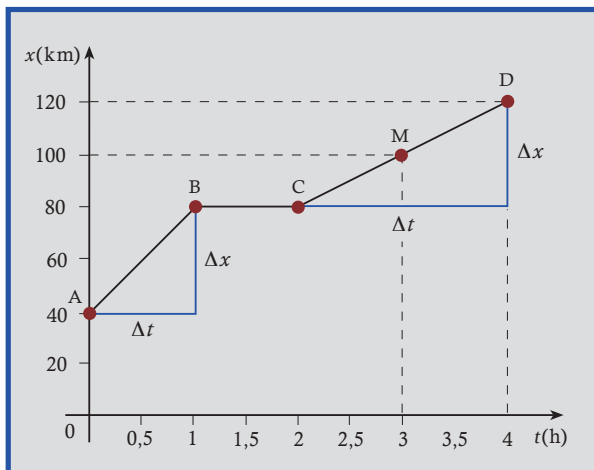


Fig. 4.9 Ejemplo 4.2.

Ejemplo 4.2

En la fig. 4.9 se muestra el gráfico que describe el movimiento de un vehículo. **a)** Describe el movimiento. **b)** ¿Cuál es la rapidez en cada segmento de la trayectoria? **c)** ¿A qué distancia del punto de observación partió el vehículo. **d)** ¿A qué distancia del punto de observación estaba el vehículo a las 3 horas?

Solución

a) El movimiento puede describirse en base a 3 etapas correspondientes a los segmentos de recta AB, BC, y CD. El punto de observación está en $x = 0$.

Segmento AB: El movimiento es rectilíneo uniforme. El vehículo pasa de un punto A, alejado 40 km del punto de observación, a otro punto B, alejado 80 km. Este recorrido lo realiza en 1 hora, desde $t = 0$ (punto A) hasta $t = 1$ (punto B).

Segmento BC: En el punto B el móvil se detiene durante 1 hora, desde $t = 1$ hasta $t = 2$. Esto se puede ver del gráfico porque en el punto C el valor de x es exactamente igual al del punto B.

Segmento CD: El movimiento es rectilíneo uniforme. El móvil se aleja desde el punto de observación, de la posición $x = 80$ (punto C) hasta $x = 120$ (punto D), recorrido que realiza en un intervalo de tiempo de 2 horas, desde $t = 2$ hasta $t = 4$.

b) Para calcular la rapidez del vehículo, determinamos la pendiente en cada segmento de la trayectoria. Para ello, tomamos un incremento Δx cualquiera y obtenemos el valor de Δt que le corresponda.

$$\text{Segmento AB:} \quad \Delta x = 80 - 40 = 40 \quad \Delta t = 1 - 0 = 1$$

$$V_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{40 \text{ km}}{1 \text{ h}} = 40 \text{ km/h}$$

$$\text{Segmento BC:} \quad \text{El vehículo está detenido y, por tanto, } V_m = 0$$

$$\text{Segmento CD:} \quad \Delta x = 120 - 80 = 40 \quad \Delta t = 4 - 2 = 2$$

$$V_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{40 \text{ km}}{2 \text{ h}} = 20 \text{ km/h}$$

c) Esta distancia se obtiene cuando $t = 0$. De la fig. 4.9 se observa que $x = 40$ km.

d) De la fig. 4.9, se observa que cuando $t = 3$ h, la distancia corresponde al punto M, donde $x = 100$ km.

d. El móvil se acerca hacia el origen, encontrándose inicialmente a una distancia determinada del mismo.

Este caso se muestra en la fig 4.10. Inicialmente, el vehículo se encuentra a una distancia de 50 m del origen ($x = 0$) y se mueve acercándose al mismo. Luego, pasa por el origen cuando $t = 5$ s ($x = 0$) y continúa hasta alejarse 20 m del mismo.

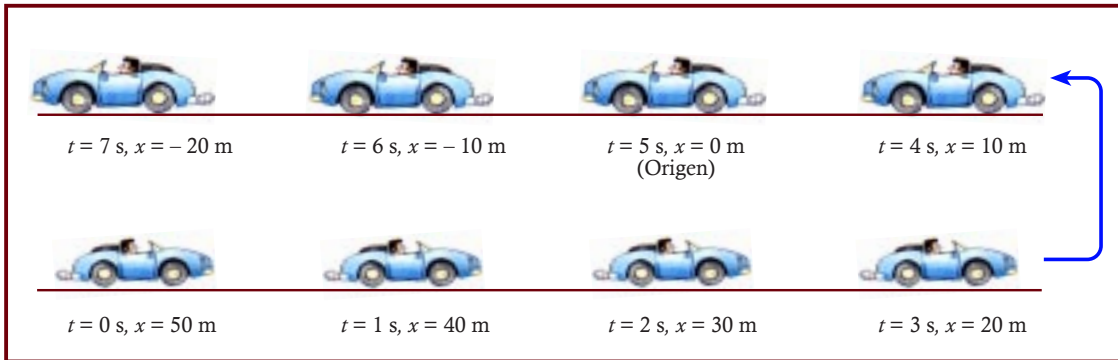


Fig. 4.10 El vehículo parte hacia el origen desde una distancia alejada 50 m del mismo y se mueve de derecha a izquierda.

Para hacer el gráfico correspondiente, primero hacemos una tabla de los valores de las posiciones en función del tiempo, tomando en cuenta que a las posiciones a la derecha del origen se les asignan signos positivos y a las que están a la izquierda del origen se les asignan signos negativos. Así, obtenemos la tabla 4.4. En la fig. 4.11 se dibujan los puntos de la tabla 4.4 y se hace el gráfico $x - t$, resultante del movimiento. De dicho gráfico, podemos obtener la rapidez del móvil calculando la pendiente de la recta:

t (s)	0	1	2	3	4	5	6	7
x (m)	50	40	30	20	10	0	-10	-20

Tabla 4.4.

$$\Delta x = 40 - 10 = 30 \quad \Delta t = 1 - 4 = -3$$

Luego:

$$\text{Pendiente} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{30 \text{ m}}{-3 \text{ s}} = -10 \text{ m/s}$$

La pendiente negativa indica que el vehículo se acerca al punto de observación. Esto es contrario a los casos anteriores, donde el móvil se alejaba del punto de observación y, por tanto, la pendiente era positiva. También puede verse en el gráfico que cuando $t = 5$ s, la línea cruza el eje de tiempo, lo cual indica

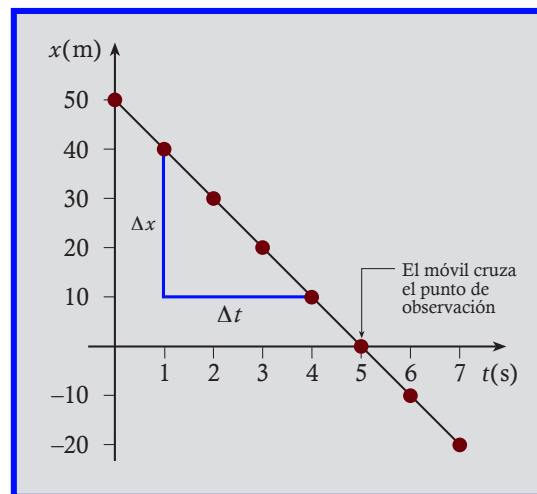


Fig. 4.11 Gráfico correspondiente a la tabla 4.4.

que el vehículo alcanza el origen y, luego, sigue moviéndose hacia posiciones negativas sobre el eje de las X. En el gráfico, esto se pone en evidencia por los valores negativos de x a partir de $t = 5$ s.

Ejemplo 4.3

En la fig. 4.12 se muestra el gráfico correspondiente a la trayectoria de un móvil que se desplaza con movimiento rectilíneo uniforme. a) Describe el movimiento. b) ¿Cuál es la rapidez del móvil en cada tramo? c) ¿Cuánto tiempo se detuvo el móvil? d) ¿Cuál es la distancia total recorrida? e) ¿Cuánto tiempo tardó el móvil en regresar? f) ¿Cuál fue el desplazamiento?.

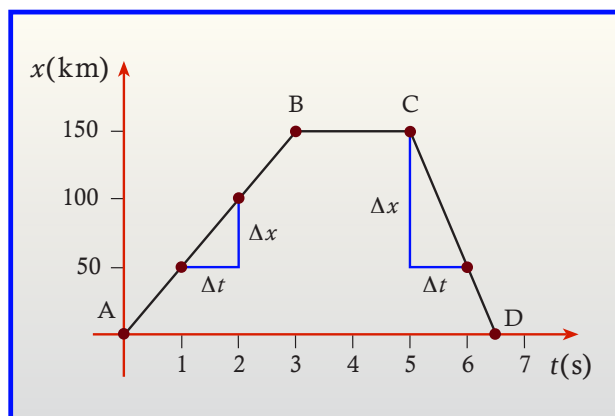


Fig. 4.12 Gráfico para el ejemplo 4.3.

Solución

a) Tramo AB: el móvil se aleja del punto de partida (A) con una rapidez constante y cuando llega hasta el punto B ha recorrido 150 km.

Tramo BC: el móvil permanece detenido.

Tramo CD: el móvil se devuelve y llega, nuevamente, al punto de partida en D.

b) Tramo AB: $\Delta x = 100 - 50 = 50$ $\Delta t = 2 - 1 = 1$

$$V_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{50 \text{ km}}{1 \text{ h}} = 50 \text{ km/h}$$

Tramo BC: el móvil está detenido y $V_m = 0$

Tramo CD: $\Delta x = 150 - 50 = 100$ $\Delta t = 5 - 6 = -1$

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{100 \text{ km}}{-1 \text{ h}} = -100 \text{ km/h} \Rightarrow V_m = 100 \text{ km/h} \text{ (El móvil se acerca al origen)}$$

c) El móvil se detuvo entre B y C por 2 horas (5 - 3).

d) Tramo AB: $\Delta x_{AB} = 150 \text{ km}$ Tramo BC: $\Delta x = 0$ Tramo CD: $\Delta x_{CD} = 150 \text{ km}$

Distancia total recorrida: $\Delta x_{AB} + \Delta x_{CD} = 150 + 150 = 300 \text{ km}$

e) El móvil regresa en el tramo CD, correspondiente a un tiempo de $6,5 - 5 = 1,5 \text{ h}$.

f) Puesto que el móvil regresa al punto de partida, su desplazamiento es igual a cero.

4.2 GRÁFICO DE LA VELOCIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Cuando un objeto tiene movimiento rectilíneo uniforme, el módulo de su velocidad permanece constante durante el recorrido. Si un vehículo se mueve según el gráfico $x - t$ de la fig. 4.13, la velocidad en cada uno de los tramos puede determinarse calculando las pendientes correspondientes:

$$\text{AB: } V_{AB} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{160 - 80}{2 - 1} = 80 \text{ km/h} \quad \text{BC: } V_{BC} = 0 \quad \text{CD: } V_{CD} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{160 - 0}{4 - 6} = -80 \text{ km/h}$$

En la fig. 4.14 se muestra el gráfico de la velocidad en función del tiempo, para todo el recorrido. Como puede observarse, la velocidad está representada por segmentos de recta paralelos al eje t . En el tramo AB la velocidad del móvil es constante e igual a 80 km/h (el objeto se aleja de su punto de partida). En el tramo BC el móvil está detenido y por tanto, su velocidad es igual a cero. Finalmente, en el tramo CD el objeto tiene una velocidad negativa de magnitud igual a 80 km/h . El signo negativo, en este caso, indica que el vehículo se acerca al punto de partida.

Hay otra conclusión importante que puede obtenerse a partir del gráfico $v - t$ de la fig. 4.14. Cuando el vehículo se mueve desde A hasta B, recorre una distancia de 160 km , según el gráfico $x - t$ de la fig. 4.13. Así mismo, entre C y D el vehículo también recorre

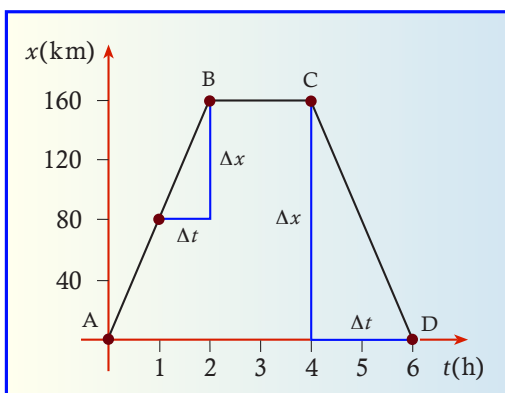


Fig. 4.13 Gráfico distancia-tiempo de un móvil.

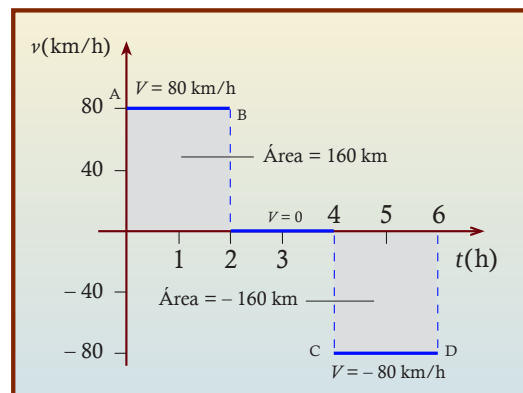


Fig. 4.14 Gráfico velocidad-tiempo para el móvil de la fig. 4.13.

160 km, puesto que regresa a su punto de partida. Si analizamos el gráfico $v - t$, vemos que tanto en el tramo AB como en el tramo CD se forman 2 rectángulos, cuyas áreas coinciden, exactamente, con la distancia recorrida en cada tramo. En efecto:

$$\text{Área del rectángulo en tramo AB: } 80 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot (2 - 0)\text{h} = 160 \text{ km}$$

$$\text{Área del rectángulo en tramo CD: } - 80 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot (6 - 4)\text{h} = - 160 \text{ km}$$

El signo negativo en el tramo CD se debe a que el vehículo se mueve en sentido contrario al eje de las X o, también, se puede decir que el móvil se acerca a su lugar de partida. De acuerdo a lo anterior, podemos afirmar:

En el movimiento rectilíneo uniforme, el área bajo los rectángulos que se forman en el gráfico $v - t$ corresponde a la distancia recorrida por el móvil.

DEMONIOS DE LA VELOCIDAD	
Guepardo	110 km/h
Antílope	98 km/h
Gacela	80 km/h
Coyote	70 km/h
Zebra	64 km/h
Conejo	56 km/h

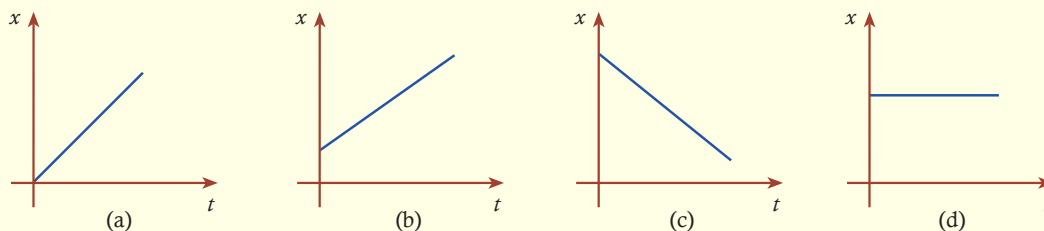


PIENSA Y EXPLICA



- 4.1 ¿Por qué crees importante o conveniente la representación del movimiento de un objeto mediante gráficos?
- 4.2 ¿Por qué en el movimiento rectilíneo uniforme el gráfico $x - t$ es siempre una línea recta?
- 4.3 ¿Por qué en el movimiento rectilíneo uniforme el gráfico $v - t$ se compone de segmentos de rectas paralelas al eje de tiempo?

4.4 Explica la diferencia de los movimientos, cuyos gráficos se presentan a continuación.



4.5 ¿Cómo puede calcularse la velocidad de un objeto que se mueve con movimiento rectilíneo uniforme, mediante el gráfico $x-t$ del mismo?

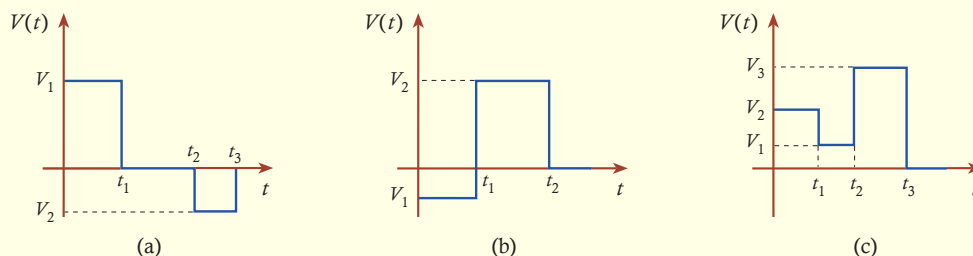
4.6 ¿Cómo se deduce de los diagramas $x-t$ y $v-t$ que un móvil está detenido?

4.7 ¿Cómo se determina la distancia recorrida a partir de un diagrama $v-t$?

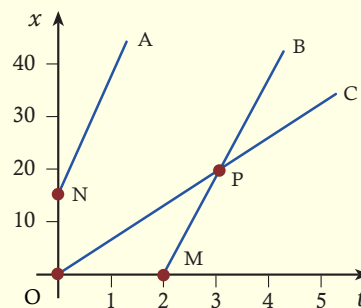
4.8 ¿Qué significado tienen una pendiente positiva o una pendiente negativa en el gráfico $x-t$ del movimiento rectilíneo uniforme?

4.9 ¿Qué significado tienen un área positiva o un área negativa en el gráfico $v-t$ del movimiento rectilíneo uniforme?

4.10 Describe con palabras el movimiento de los objetos cuyos diagramas $v-t$ se muestran a continuación.



4.11 En la figura mostrada, se indican los recorridos $x-t$ de los móviles A, B y C. **a)** ¿Cuál es el móvil más rápido? **b)** ¿Qué significa el punto P? **c)** ¿Cuál es el significado de los segmentos ON y OM? **d)** ¿Cuáles móviles parten simultáneamente? **e)** ¿Cuáles móviles arrancan del mismo punto?





PROBLEMAS



- 4.1** En la tabla 4.5 se indica la variación de la posición con el tiempo de un vehículo. **a)** A partir de la tabla, dibuja los gráficos $x-t$ y $v-t$ del móvil. **b)** Determina gráficamente la distancia recorrida entre $t = 2\text{ s}$ y $t = 6\text{ s}$. **c)** ¿Cuánto tiempo tarda el vehículo en recorrer 20 m?

$x(\text{m})$	0	5	10	15	20
$t(\text{s})$	0	2	4	6	8

Tabla 4.5.

- 4.2** La fig. 4.15 muestra la variación $x-t$ de un móvil. **a)** ¿Qué significado tiene que el gráfico no comience en el origen del plano $x-t$? **b)** ¿Cuál es la velocidad del móvil? **c)** ¿Cuál es la distancia recorrida en 4 segundos? **d)** ¿Cuál es el desplazamiento del móvil en 4 s? **e)** ¿Se acerca o se aleja el móvil del punto de observación? **f)** ¿Cuál es la pendiente de la recta?

- 4.3** Un vehículo se mueve según el gráfico de la fig. 4.16. **a)** ¿A qué distancia del observador se encuentra el vehículo inicialmente? **b)** Dibuja el gráfico $v-t$. **c)** ¿Se acerca o se aleja el vehículo del punto de observación? **d)** ¿Cuál es la pendiente del gráfico? **e)** ¿Qué significado tiene el valor negativo de la velocidad? **f)** ¿Cuánto tiempo se detiene el vehículo? **g)** ¿Cuál es la distancia total recorrida? **h)** ¿Cuál es el vector desplazamiento?

- 4.4** El gráfico de la fig. 4.17 corresponde a un objeto que se mueve con movimiento rectilíneo uniforme. **a)** Describe el movimiento en función del tiempo. **b)** Dibuja el gráfico $v-t$. **c)** ¿Cuál es la posición del objeto para $t = 0, 1, 5, 7$ segundos? **d)** ¿Cuánto tiempo estuvo detenido el móvil? **e)** ¿A qué distancia del origen estaba el objeto cuando $t = 4\text{ s}$? **f)** ¿Cuál es el desplazamiento del objeto?

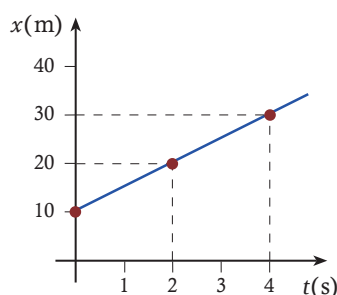


Fig. 4.15 Problema 4.2.

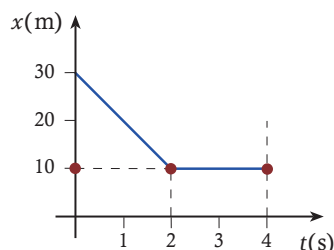


Fig. 4.16 Problema 4.3.

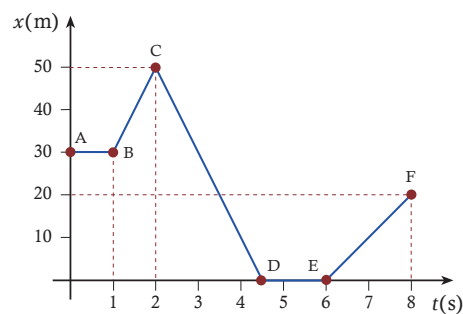


Fig. 4.17 Problema 4.4.

CAPÍTULO 5



Aceleración y Caída Libre

5.1 ACELERACIÓN

En los capítulos anteriores estudiamos el movimiento rectilíneo uniforme, según el cual un móvil se desplaza en línea recta con v velocidad constante. En la mayoría de las situaciones físicas reales, los cuerpos no se mueven con velocidad constante. Por el contrario, el cambio en la velocidad de desplazamiento es lo común en el movimiento de un cuerpo.

Al cambio de velocidad de un móvil con el tiempo se le denomina aceleración.

Como la velocidad es una cantidad vectorial, con magnitud y dirección, el cambio en la misma puede producirse en cualesquiera de esos dos componentes. Es decir, un objeto en movimiento acelera si cambia su magnitud, su dirección o ambos atributos. En la fig. 5.1(a) se muestra un vehículo moviéndose en línea recta, sin cambiar su dirección, y que varía la magnitud de su velocidad desde $V = 10 \text{ km/h}$ hasta $V = 40 \text{ km/h}$, en un tiempo de 10 segundos.

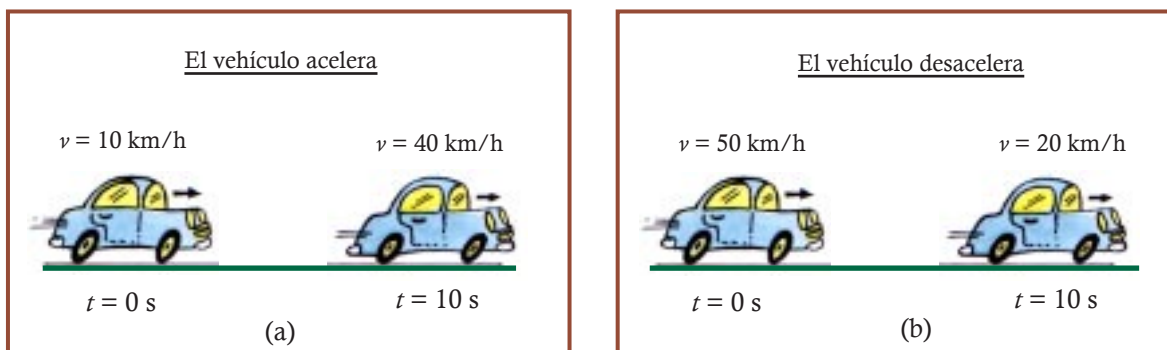


Fig. 5.1 (a) El vehículo acelera, ya que aumenta la magnitud de su velocidad. (b) El vehículo desacelera, ya que disminuye la magnitud de su velocidad.

Como el vehículo aumenta su velocidad, se dice que ha experimentado una *aceleración* y se habla de un *movimiento acelerado*. Por el contrario, el vehículo de la fig 5.1 (b) cambia la magnitud de su velocidad de 50 km/h a 20 km/h en 10 segundos. Como el vehículo disminuye su velocidad, se dice que se produjo una *desaceleración* del mismo y se habla de un *movimiento retardado* o *desacelerado*.

Un móvil puede mantener constante el módulo de su velocidad, pero cambiar la dirección, como sucede cuando se mueve en una trayectoria curva. Bajo esta condición, también el móvil acelera. En la fig. 5.2 se muestra un ejemplo de esta situación. El vehículo se desplaza, en principio, hacia el Norte a una velocidad de 60 km/h. Al entrar a la curva hace un giro para dirigirse hacia el Este. Durante la trayectoria, mantiene el módulo de la velocidad constante, pero su dirección cambia continuamente para lograr el rumbo establecido por el conductor. Este cambio de dirección también se interpreta, desde el punto de vista de la Física, como una aceleración.

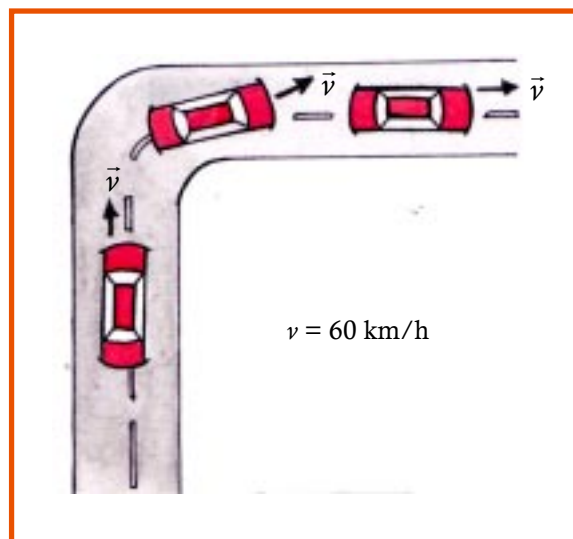


Fig. 5.2 Aunque el vehículo mantiene constante el módulo de su velocidad (60 km/h), su dirección cambia y, por tanto, acelera.

Por supuesto, puede darse el caso en el cual un móvil cambie tanto el módulo de su velocidad como la dirección de la misma, lo que resulta en una aceleración debida a esos dos factores.

En la vida real, la presencia de la aceleración se pone de manifiesto por la sensación de ser “empujado”, cuando un vehículo donde nos desplazamos cambia su velocidad. En

efecto (ver Fig. 5.3.), en una trayectoria rectilínea, cuando el vehículo aumenta su velocidad, nos sentimos empujados hacia atrás, mientras que cuando el vehículo frena y disminuye su velocidad, sentimos que somos empujados hacia delante (ver fig. 5.4).



Fig. 5.3 Cuando un vehículo aumenta su velocidad (acelera), los tripulantes del mismo son empujados hacia atrás.



Fig. 5.4 Cuando un vehículo frena (desacelera), disminuyendo su velocidad, los tripulantes del mismo son empujados hacia delante.



Fig. 5.5 Si el vehículo gira hacia la derecha, se produce una aceleración hacia la izquierda.

Un cambio en la dirección del v vehículo también afecta a los pasajeros del mismo. En efecto, un cambio brusco hacia la derecha es percibido por los ocupantes del vehículo como un empujón hacia la izquierda, como se muestra en la fig. 5.5, mientras que un cambio hacia la izquierda es percibido como un empujón hacia la derecha.

5.2 ACCELERACIÓN INSTANTÁNEA Y ACCELERACIÓN MEDIA

Cuando un cuerpo en movimiento se desplaza de un lugar a otro, describe una trayectoria a lo largo de la cual su velocidad, casi seguramente, variará con frecuencia. Esta variación de velocidad, bien sea en magnitud o en dirección, produce una aceleración. Al cambio que experimenta la velocidad a cada momento se le denomina *aceleración instantánea*.

El pájaro en vuelo de la fig 5.6 es un ejemplo típico de cómo varía, instantáneamente, la velocidad durante toda la trayectoria. Tanto la magnitud como la dirección de la misma, pueden experimentar cambios bruscos, dando origen a variaciones instantáneas de la aceleración. El tamaño del vector indica la magnitud de la velocidad.

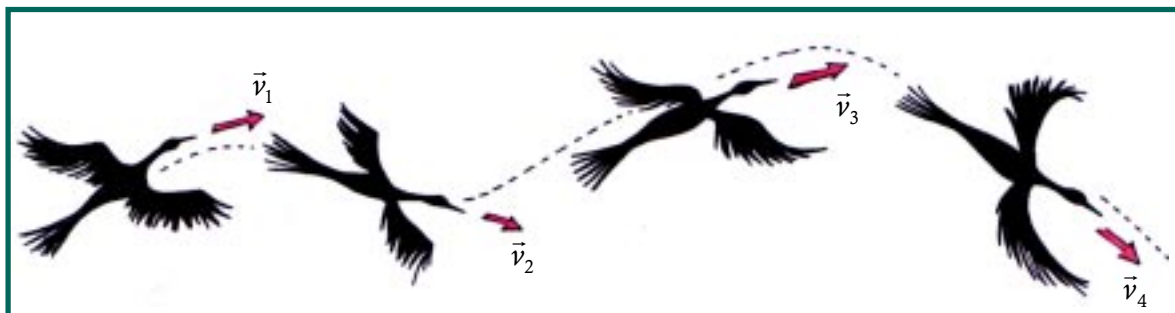


Fig. 5.6 El pájaro cambia su dirección y magnitud de vuelo a cada momento, originando, a la vez, cambios instantáneos en la aceleración.

Al igual que la velocidad instantánea, la aceleración instantánea es, también, un vector que posee una magnitud y una dirección. A menudo, se utiliza el concepto de *aceleración media*, que se define como *el cambio de velocidad dividido entre el tiempo en el cual se efectuó ese cambio*. Es decir:

$$\text{Aceleración media} = \frac{\text{Cambio de velocidad}}{\text{Tiempo en el cual se produce el cambio de velocidad}}$$

O, también:

$$\vec{a}_m = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_o}{t_f - t_o} \quad (5.1)$$

Donde:

$\vec{v}_f$ es la velocidad instantánea en un tiempo cualquiera t_f .

$\vec{v}_o$ es la velocidad instantánea en un tiempo tomado como inicial, t_o .

t_f es un tiempo cualquiera en la trayectoria del móvil

t_o es un tiempo tomado como inicial o de referencia.

Por definición, la aceleración es un cambio de velocidad, cuya magnitud se expresa en unidades tales como m/s, km/h, dividida entre unidades de tiempo (segundos, horas). Así, si un móvil varía su velocidad de 10 m/s a 40 m/s en la dirección positiva del eje X en un tiempo de 5 s, su aceleración media está dada por:

$$\vec{a}_m = \frac{40\vec{i} \text{ m/s} - 10\vec{i} \text{ m/s}}{5 \text{ s}} = \frac{30}{5}\vec{i} \frac{\text{m/s}}{\text{s}} = 6\vec{i} \text{ m/s}^2$$

Es decir, las unidades de aceleración se expresan en unidades de longitud divididas entre unidades de tiempo, elevadas al cuadrado.

Ejemplo 5.1

Un automóvil se desplaza en línea recta en la dirección positiva del eje X, tal como se muestra en la fig. 5.7. El vehículo cambia su velocidad de 20 km/h a 80 km/h en $t = 30$ s. Después de transcurridos 50 segundos, su velocidad cambia a 20 km/h. Entre $t = 50$ s y $t = 120$ s, el automóvil mantiene su velocidad constante e igual a 20 km/h. **a)** Determina la aceleración del vehículo en los intervalos AB, BC y CD. **b)** ¿Cuál es la aceleración instantánea del vehículo cuando $t = 30$ s y $t = 70$ s.

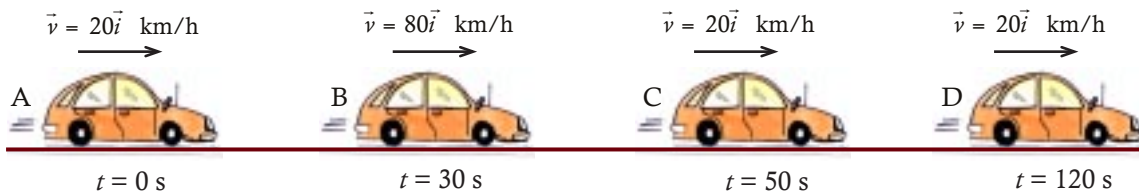


Fig. 5.7 Ejemplo 5.1.

Solución

a) Intervalo AB:

$$\vec{v}_f = 80\vec{i} \text{ km/h} \quad v_o = 20\vec{i} \text{ km/h} \quad t_f = 30 \text{ s} \quad t_o = 0$$

Luego:

$$\vec{a}_m = \frac{(80 - 20)\vec{i}}{30 - 0} \frac{\text{km/h}}{\text{s}} = 2\vec{i} \frac{\text{km/h}}{\text{s}}$$

El resultado anterior indica que, cada segundo, la velocidad del carro aumenta 2 km/h en la dirección positiva del eje X ($+\vec{i}$). En este caso, tanto la velocidad como la aceleración tienen la misma dirección, dada por el vector unitario $+\vec{i}$ y el movimiento es acelerado. La aceleración obtenida puede expresarse en m/s^2 , reduciendo kilómetros a metros y horas a segundos:

$$\frac{\text{km}}{\text{h}} \Rightarrow \frac{1.000 \text{ m}}{3.600 \text{ s}} \Rightarrow \frac{10}{36} \text{ m/s}$$

Entonces:

$$2\vec{i} \frac{\text{km/h}}{\text{s}} \Rightarrow \frac{2 \cdot 10\vec{i}}{36} \frac{\text{m/s}}{\text{s}} \Rightarrow \frac{20}{36}\vec{i} \text{ m/s}^2 \Rightarrow 0,56\vec{i} \text{ m/s}^2$$

Finalmente:

$$\vec{a} = 0,56\vec{i} \text{ m/s}^2$$

Intervalo BC:

$$\vec{v}_f = 20\vec{i} \text{ km/h} \quad v_o = 80\vec{i} \text{ km/h} \quad t_f = 50 \text{ s} \quad t_o = 30 \text{ s}$$

La aceleración media entre B y C es:

$$\vec{a}_m = \frac{(20 - 80)\vec{i}}{50 - 30} \frac{\text{km/h}}{\text{s}} = \frac{-60}{20}\vec{i} \frac{\text{km/h}}{\text{s}} = -3\vec{i} \frac{\text{km/h}}{\text{s}} = 3(-\vec{i}) \frac{\text{km/h}}{\text{s}}$$

Observa con cuidado el signo negativo obtenido en el resultado. Esto significa, para este ejemplo, lo siguiente:

- La magnitud de la velocidad disminuyó de valor en el intervalo (desde 80 km/h a 20 km/h).
- La dirección de la aceleración es contraria ($-\vec{i}$) respecto a la dirección de la velocidad ($+\vec{i}$).
- El movimiento es desacelerado.

El resultado también indica que la velocidad disminuye (signo negativo) 3 km/h cada segundo.

Intervalo CD:

$$\vec{v}_f = 20\vec{i} \text{ km/h} \quad v_o = 20\vec{i} \text{ km/h} \quad t_f = 120 \text{ s} \quad t_o = 50 \text{ s}$$

La aceleración media es, en este caso:

$$\vec{a}_m = \frac{(20 - 20)\vec{i}}{120 - 50} \frac{\text{km/h}}{\text{s}} = 0$$

Resultado que nos indica que no hay aceleración durante este intervalo. Este resultado es de esperar, ya que la velocidad permanece constante entre C y D tanto en módulo como en dirección.

b) Es imposible determinar la aceleración instantánea para $t = 30 \text{ s}$ con la información dada en el problema, pues no se conoce cuáles valores tenía la aceleración en cada momento en el intervalo AB. En el intervalo CD la velocidad permanece constante y, por tanto, la aceleración es igual a cero durante todo el intervalo, incluyendo $t = 70 \text{ s}$.

5.3 ACCELERACIÓN UNIFORME

En un movimiento acelerado, la velocidad cambia de un punto a otro bien sea en magnitud o en módulo. La aceleración instantánea es una expresión de estos cambios puntuales de velocidad. El concepto de aceleración media es una forma conveniente de expresar esos cambios de velocidad. Un caso particular en el movimiento acelerado es aquel en el cual la aceleración permanece constante, durante el desplazamiento del móvil. En este caso, se habla de *movimiento uniformemente acelerado*. Si el desplazamiento tiene lugar en línea recta, como será considerado en este capítulo se habla de *movimiento rectilíneo uniformemente acelerado*.

Se dice que un móvil posee un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado cuando se desplaza en línea recta y, para intervalos de tiempos iguales, se producen cambios iguales en su velocidad.

Así, si un móvil posee una aceleración uniforme o constante de $10\vec{i}$ (km/h)/s, se está afirmando que se desplaza, según el eje positivo de las X, con una tasa de cambio constante de 10 km/h cada segundo.

En la fig. 5.8 se ilustra la manera cómo un vehículo se desplaza con aceleración constante en la dirección positiva del eje X.

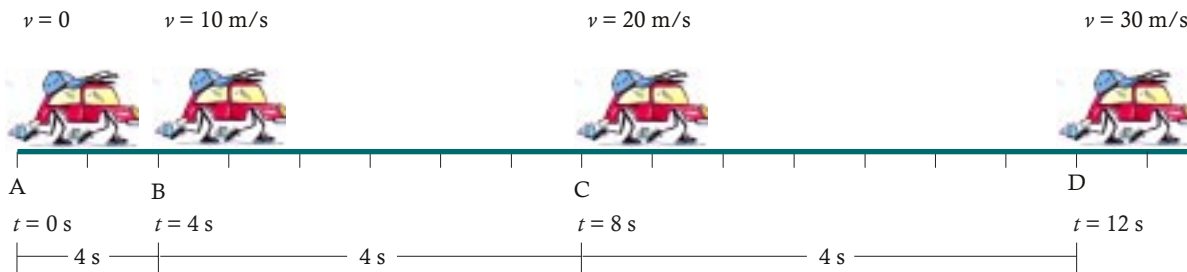


Fig. 5.8 El vehículo posee una aceleración constante, ya que varía su velocidad 10 m/s cada 4 segundos.

La aceleración es constante por que cada 4 segundos la velocidad cambia 10 m/s. Si calculamos la magnitud de la aceleración media en los intervalos AB, BC y CD encontramos, según la relación (5.1):

$$\text{Intervalo AB: } a_m = \frac{10 - 0}{4 - 0} \frac{\text{m/s}}{\text{s}} = 2,5 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Intervalo BC: } a_m = \frac{20 - 10}{8 - 4} \frac{\text{m/s}}{\text{s}} = 2,5 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Intervalo CD: } a_m = \frac{30 - 20}{12 - 8} \frac{\text{m/s}}{\text{s}} = 2,5 \text{ m/s}^2$$

Estos resultados señalan que la aceleración media permanece constante. Lo anterior, puede generalizarse de la siguiente manera:

En el movimiento rectilíneo uniformemente acelerado la aceleración media es constante.

Es importante observar en la fig. 5.8 que la distancia recorrida aumenta, a medida que se incrementa la velocidad. Así, la distancia entre C y D es mayor que la distancia entre B y C y, esta última, es mayor que la distancia entre A y B.

Si designamos la aceleración constante por $\vec{a}$, de acuerdo a la conclusión anterior podemos escribir:

$$\vec{a} = \vec{a}_m = \frac{\vec{v} - \vec{v}_o}{t - t_o} \quad (5.2)$$

Donde $\vec{v}$ es la velocidad en cualquier instante de tiempo t y $\vec{v}_o$ es la velocidad inicial, cuando se comenzó la observación en el instante de tiempo t_o .

A menudo, el comienzo de la observación se toma para $t_o = 0$. Esto no significa que el tiempo sea igual a cero, sino que, arbitrariamente, tomamos $t_o = 0$ como referencia de partida para iniciar nuestra observación. En este caso, la relación (5.2) se convierte en:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_o}{t} \quad (5.3)$$

De la relación anterior, podemos obtener la expresión de la velocidad de un móvil, en cualquier tiempo t , conocidas su velocidad inicial y su aceleración:

$$\vec{v} = \vec{v}_o + \vec{a}t \quad (5.4)$$

Relación que expresa la velocidad de un móvil, en un tiempo cualquiera t , como la suma de la velocidad inicial del mismo y el producto de la aceleración por el tiempo transcurrido.

Cuando el movimiento es rectilíneo, es usual omitir la representación vectorial de la velocidad y expresar la relación (5.4) como:

$$v = v_o + at \quad (\text{Movimiento uniformemente acelerado}) \quad (5.5)$$

$$v = v_o - at \quad (\text{Movimiento uniformemente desacelerado}) \quad (5.6)$$

Con el fin de obtener una expresión para la distancia recorrida por un móvil con movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, haremos uso de la representación gráfica de la relación (5.4). Para ello, observamos que cuando $t = 0$, $v = v_o$ y que para cualquier t , la velocidad es igual a $v_o + at$. Esto se muestra en la fig. 5.9.

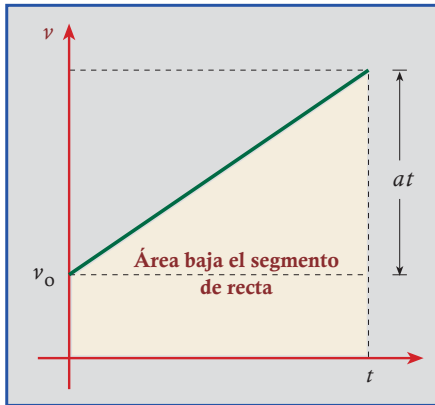


Fig. 5.9 Representación general de la velocidad según la relación (5.4). El área bajo la curva es igual a la distancia recorrida.

Como vimos en el capítulo 4, sección 4.2, el área bajo la curva de un gráfico $v - t$ representa la distancia recorrida por un móvil. Para la fig. 5.9, esta área es igual a la suma de las superficies del rectángulo y del triángulo sombreados. Es decir:

$$A_{\text{Rectángulo}} = v_o t \quad A_{\text{Triángulo}} = \frac{1}{2} at^2$$

Luego, la distancia total recorrida en el tiempo t es:

$$x = v_o t + \frac{1}{2} at^2 \quad (5.7)$$

Cuando el movimiento es rectilíneo y uniformemente retardado, la expresión de la distancia recorrida es:

$$x = v_o t - \frac{1}{2} at^2 \quad (5.8)$$

De las relaciones (5.5) y (5.7), podemos eliminar el tiempo, despejando t de (5.5) y sustituyendo en (5.7). De (5.5):

$$t = \frac{v - v_o}{a}$$

Introduciendo este valor en (5.7):

$$\begin{aligned}
 x &= v_o \left(\frac{v - v_o}{a} \right) + \frac{1}{2} a \left(\frac{v - v_o}{a} \right)^2 = \frac{v_o v}{a} - \frac{v_o^2}{a} + \frac{1}{2a} (v^2 - 2vv_o + v_o^2) = \\
 &= \frac{v_o v}{a} - \frac{v_o^2}{a} + \frac{v^2}{2a} - \frac{v_o v}{a} + \frac{v_o^2}{2a} = \frac{v^2}{2a} - \frac{v_o^2}{2a} = \frac{v^2 - v_o^2}{2a}
 \end{aligned}$$

Finalmente:

$$x = \frac{v^2 - v_o^2}{2a} \quad (5.9)$$

De donde:

$$v^2 = v_o^2 + 2ax \quad (\text{Movimiento uniformemente acelerado}) \quad (5.10)$$

Usando (5.6) y (5.8), podemos obtener una relación como la anterior para el movimiento uniformemente retardado:

$$v^2 = v_o^2 - 2ax \quad (\text{Movimiento uniformemente retardado}) \quad (5.11)$$

Cuando la velocidad inicial es igual a cero ($v_o = 0$) y $t = 0$, se dice que el cuerpo parte del reposo, en cuyo caso las relaciones para el movimiento uniformemente acelerado se convierten en:

$$v = at \quad x = \frac{1}{2} at^2 \quad v^2 = 2ax \quad (5.12)$$

Ejemplo 5.2

Un móvil parte del reposo y mantiene una aceleración constante e igual a 2m/s^2 . **a)** Determina su velocidad para $t = 2, 3, 4$ segundos **b)** ¿Cuál es la distancia recorrida en los tiempos mencionados en (a)? **c)** Haz un esquema de la distancia recorrida por el móvil y de su velocidad en el eje X. **d)** ¿Cuál es la velocidad alcanzada cuando el móvil ha cubierto 12 m de su recorrido?

Solución

a) Como el móvil parte del reposo, para $t = 0$ su velocidad inicial es nula ($v_0 = 0$). De acuerdo a (5.12), $v = at$:

$$t = 2 \text{ s} \quad \Rightarrow \quad v = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2 \text{ s} = 4 \text{ m/s}$$

$$t = 3 \text{ s} \quad \Rightarrow \quad v = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 3 \text{ s} = 6 \text{ m/s}$$

$$t = 4 \text{ s} \quad \Rightarrow \quad v = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 4 \text{ s} = 8 \text{ m/s}$$

b) De (5.12), la distancia recorrida se determina mediante la fórmula $x = \frac{1}{2}at^2$. Luego:

$$t = 2 \text{ s} \quad \Rightarrow \quad x = \frac{1}{2} \cdot 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 4 \text{ s}^2 = 4 \text{ m}$$

$$t = 3 \text{ s} \quad \Rightarrow \quad x = \frac{1}{2} \cdot 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 9 \text{ s}^2 = 9 \text{ m}$$

$$t = 4 \text{ s} \quad \Rightarrow \quad x = \frac{1}{2} \cdot 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 16 \text{ s}^2 = 16 \text{ m}$$

c) En la fig. 5.10 se muestra cómo varía la distancia recorrida por el móvil con el tiempo. Se indica, además, el valor de la velocidad para $t = 0, 2, 3$ y 4 segundos.

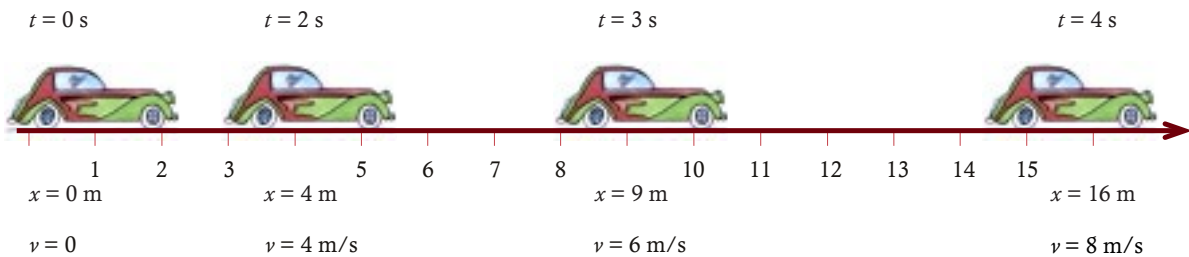


Fig. 5.10 Variación de la distancia y la velocidad del móvil del ejemplo 5.2.

d) De la relación (5.12):

$$v^2 = 2ax \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{2ax} = \sqrt{2 \cdot 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 12 \text{ m}} = \sqrt{48 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 6,93 \text{ m/s}$$

Ejemplo 5.3

Un corredor de 400 m planos alcanza una velocidad de 2,5 m/s, cuando ha recorrido 300 m. A partir de allí, en los últimos 100 m, mantiene una aceleración constante e igual a 1,5 m/s². a) ¿Cuál es el módulo de su velocidad al final de la carrera? b) ¿Cuánto tiempo tardó en recorrer los últimos 100 m?

Solución

a) Usando la relación (5.10) con $v_0 = 2,5$ m/s, $a = 1,5$ m/s² y $x = 100$ m:

$$v^2 = v_0^2 + 2ax \Rightarrow v^2 = (2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 + 2 \cdot 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 100 \text{ m}$$

$$v^2 = 6,25 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} + 300 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 306,25 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \Rightarrow v = \sqrt{306,25 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 17,5 \text{ m/s}$$

b) De la relación (5.7), $x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$. Sustituyendo valores:

$$100 = 2,5t + \frac{1}{2} \cdot 1,5t^2 \Rightarrow 0,75t^2 + 2,5t - 100 = 0$$

$$t = \frac{-2,5 \pm \sqrt{6,25 + 300}}{1,50} = \frac{-2,5 \pm 17,5}{1,50} \Rightarrow t = 10 \text{ s}$$

Donde se ha hecho caso omiso del resultado negativo para el tiempo.

Ejemplo 5.4

Un vehículo que parte del reposo acelera hasta 3 m/s² durante 4 s, mantiene su velocidad constante durante 6 s, acelera 1 m/s² durante 8 s y, después, desacelera 2 m/s² hasta alcanzar, nuevamente, el reposo. ¿Qué distancia recorrió?

Solución

Determinaremos la distancia recorrida utilizando las relaciones apropiadas para cada etapa del movimiento del vehículo.

a) El vehículo parte del reposo ($v_0 = 0$) y acelera 3 m/s² durante 4s:

$$x = \frac{1}{2} a t^2 = \frac{1}{2} \cdot 3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (4 \text{ s})^2 = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 16 \text{ m} = 24 \text{ m}$$

La velocidad al final de los 4 s es:

$$v = \sqrt{2ax} = \sqrt{2 \cdot 3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 24 \text{ m}} = \sqrt{144 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 12 \text{ m/s}$$

b) El vehículo mantiene su velocidad constante durante 6 s. El valor de la magnitud de esta velocidad es de 12 m/s. Como el movimiento es uniforme, se tiene:

$$v = \frac{x}{t} \Rightarrow x = vt = 12 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 6 \text{ s} = 72 \text{ m}$$

c) El vehículo acelera nuevamente 1 m/s^2 durante 8 s, partiendo de una velocidad inicial igual a la velocidad constante del caso anterior ($v_o = 12 \text{ m/s}$):

$$x = v_o t + \frac{1}{2} at^2 = 12 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 8 \text{ s} + \frac{1}{2} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 64 \text{ s}^2 = 96 \text{ m} + 32 \text{ m} = 128 \text{ m}$$

Al final de $t = 8 \text{ s}$ la velocidad es:

$$v = \sqrt{v_o^2 + 2ax} = \sqrt{\left(12 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + 2 \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 128 \text{ m}} = \sqrt{144 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} + 256 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = \sqrt{400 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 20 \text{ m/s}$$

d) El vehículo desacelera 2 m/s^2 hasta alcanzar el reposo. La velocidad inicial, en esta etapa, corresponde a la velocidad al final de los 8 s ($v_o = 20 \text{ m/s}$), mientras que cuando se alcanza el reposo, $v = 0$. Luego:

$$v^2 = v_o^2 - 2ax \Rightarrow 0 = v_o^2 - 2ax \Rightarrow x = \frac{v_o^2}{2a}$$

Sustituyendo valores:

$$x = \frac{(20 \text{ m/s})^2}{4 \text{ m/s}^2} = \frac{400 \text{ m}^2/\text{s}^2}{4 \text{ m/s}^2} = 100 \text{ m}$$

Entonces, la distancia total recorrida es:

$$x_T = (24 + 72 + 128 + 100) \text{ m} = 324 \text{ m}$$

Ejemplo 5.5

El tiempo de reacción de un conductor es el intervalo de tiempo transcurrido entre una señal de alerta, que le indica que debe detener el vehículo y la aplicación de los frenos. Un vehículo atraviesa una zona escolar a una velocidad constante de 30 km/h. Su conductor



observa a un niño enfrente del vehículo a 15 m del mismo. Aplica el freno, desacelerando el carro a 5 m/s^2 . Si su tiempo de reacción es de 0,4 s, ¿atropellará el vehículo al niño?

Solución

Primero, hagamos la reducción de km/h a m/s:

$$30 \text{ km/h} \Rightarrow \frac{30.000 \text{ m}}{3.600 \text{ s}} = 8,33 \text{ m/s}$$

De acuerdo con el enunciado del problema, la velocidad anterior se mantiene constante hasta que se aplica el freno. Durante el tiempo de reacción del conductor ($t = 0,4 \text{ s}$), el vehículo se desplaza, a velocidad constante, una distancia dada por:

$$x = vt = 8,33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,4 \text{ s} = 3,33 \text{ m}$$

A partir del momento que se aplica el freno, el movimiento es desacelerado y se emplea la relación (5.11) con $v = 0$:

$$v^2 = v_0^2 - 2ax \Rightarrow x = \frac{v_0^2}{2a} = \frac{(8,33 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 5 \text{ m/s}^2} = \frac{69,39 \text{ m}^2/\text{s}^2}{10 \text{ m/s}^2} = 6,94 \text{ m}$$

Sumando las distancias anteriores, obtenemos el recorrido total:

$$x = (3,33 + 6,94) \text{ m} = 10,27 \text{ m}$$

Como el niño está a 15 m, el carro no lo atropella.

Ejemplo 5.6

Una bala que se desplaza a una velocidad de 40 m/s, choca contra una pared de 10 cm de espesor y sale por el otro lado con una velocidad de 10 m/s. a) ¿Cuál fue la desaceleración de la bala dentro de la pared. b) ¿Cuánto tardó en atravesarla?

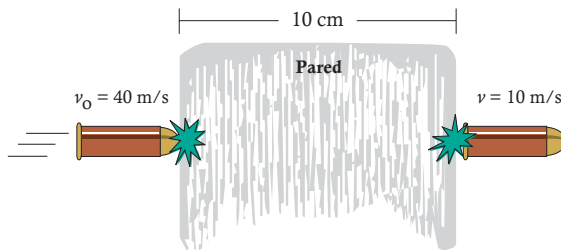


Fig. 5.11 Ejemplo 5.6.

Solución

En la fig. 5.11 se muestra un esquema del movimiento de la bala.

a) Como el movimiento es retardado, usamos la relación (5.11):

$$v^2 = v_o^2 - 2ax \Rightarrow 2ax = v_o^2 - v^2 \Rightarrow a = \frac{v_o^2 - v^2}{2x}$$

Sustituyendo valores ($v_o = 40$ m/s, $v = 10$ m/s, $x = 0,10$ m):

$$a = \frac{(40 \text{ m/s})^2 - (10 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 0,10 \text{ m}} = \frac{(1.600 - 100) \text{ m}^2/\text{s}^2}{0,2 \text{ m}} = 7.500 \text{ m/s}^2$$

La aceleración, en este caso, se opone al movimiento y tiene dirección opuesta a la de la velocidad. Observa que la desaceleración es muy alta y, por ello, la velocidad baja tan violentamente de 40 m/s a 10 m/s en el recorrido de sólo 10 cm.

b) Con el fin de determinar el tiempo que tardó la bala en atravesar la pared, usamos la relación (5.6):

$$v = v_o - at \Rightarrow at = v_o - v \Rightarrow t = \frac{v_o - v}{a}$$

Luego:

$$t = \frac{40 \text{ m/s} - 10 \text{ m/s}}{7.500 \text{ m/s}^2} = \frac{30 \text{ m/s}}{7.500 \text{ m/s}^2} = 0,004 \text{ s}$$

Como puede inferirse del resultado anterior, la bala tarda un tiempo muy pequeño en atravesar la pared.

5.4 GRÁFICOS EN EL MOVIMIENTO RECTILÍNEO UNIFORMEMENTE ACCELERADO

Las relaciones (5.5) y (5.6) expresan cómo varía la velocidad v con el tiempo t :

$$v = v_o \pm at \quad (5.13)$$

Donde el signo *más* (+) se aplica al movimiento acelerado y el signo *menos* (−) corresponde al movimiento desacelerado. En la fig. 5.12(a) y (b) se muestran gráficos para la relación 5.13. La pendiente de las líneas rectas de las fig. 5.13(a) y (b) corresponde a la aceleración, en cada caso. En efecto, para el movimiento acelerado se tiene:

$$\text{Pendiente} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{at}{t} = a$$

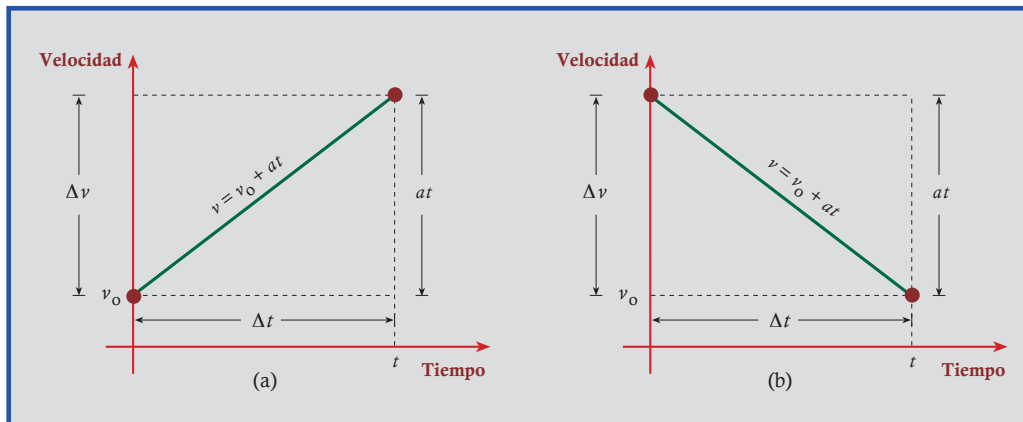


Fig. 5.12 Gráficos para el movimiento rectilíneo: a) Uniformemente acelerado, b) Uniformemente retardado.

Para el movimiento retardado:

$$\text{Pendiente} = -\frac{\Delta v}{\Delta t} = -\frac{at}{t} = -a$$

Observa que, en el último caso, la pendiente es negativa. En la fig. 5.13 se muestra el gráfico de la aceleración en función del tiempo, tanto en el movimiento acelerado como en el retardado.

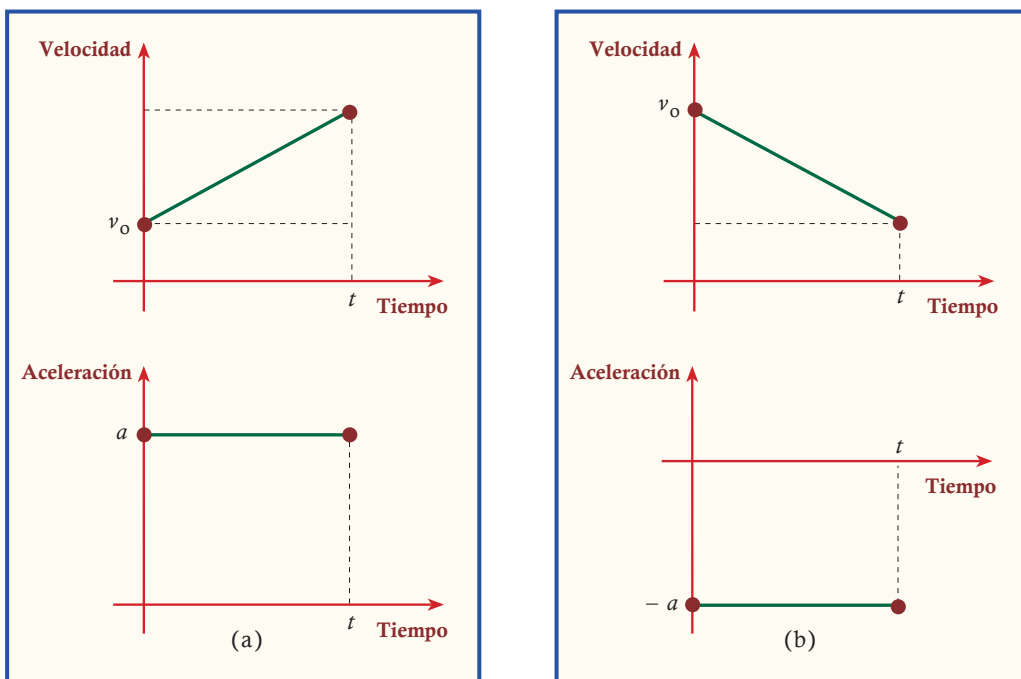


Fig. 5.13 Gráficos de la velocidad y aceleración para el movimiento: a) Uniformemente acelerado. b) Uniformemente retardado.

Como fue demostrado mediante el gráfico de la fig. 5.9, el área bajo la curva velocidad-tiempo, corresponde a la distancia recorrida por un móvil en el tiempo t .

Ejemplo 5.7

En la fig. 5.14(a) se muestra la velocidad de un móvil en función del tiempo. **a)** Dibuja el gráfico aceleración - tiempo. **b)** Determina la distancia total recorrida por el móvil.

Solución

a) Para dibujar el gráfico $a - t$, es necesario determinar la pendiente ($\Delta v / \Delta t$) del gráfico $v - t$ para todos los intervalos.

$$0 \leq t < 2 : \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(30 - 0) \text{ m/s}}{(2 - 0) \text{ s}} = 15 \text{ m/s}^2$$

$$2 \leq t < 8 : \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(30 - 30) \text{ m/s}}{(8 - 2) \text{ s}} = 0 \text{ m/s}^2$$

$$8 \leq t < 12 : \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(0 - 30) \text{ m/s}}{(12 - 8) \text{ s}} = -7,5 \text{ m/s}^2$$

En la fig. 5.14(b) se muestra el gráfico aceleración - tiempo.

b) El área bajo la curva $v - t$ de la fig. 5.14(c) es igual a la distancia recorrida por el móvil:

$0 \leq t < 2$: Distancia = Área del triángulo OAE

$$\text{Área} = \frac{1}{2} \cdot (2 - 0) \text{ s} \cdot (30 - 0) \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 30 \text{ m} = 30 \text{ m}$$

$0 \leq t < 8$: Distancia = Área del rectángulo ABDE

$$\text{Área} = (30 - 0) \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot (8 - 2) \text{ s} = 30 \cdot 6 \text{ m} = 180 \text{ m}$$

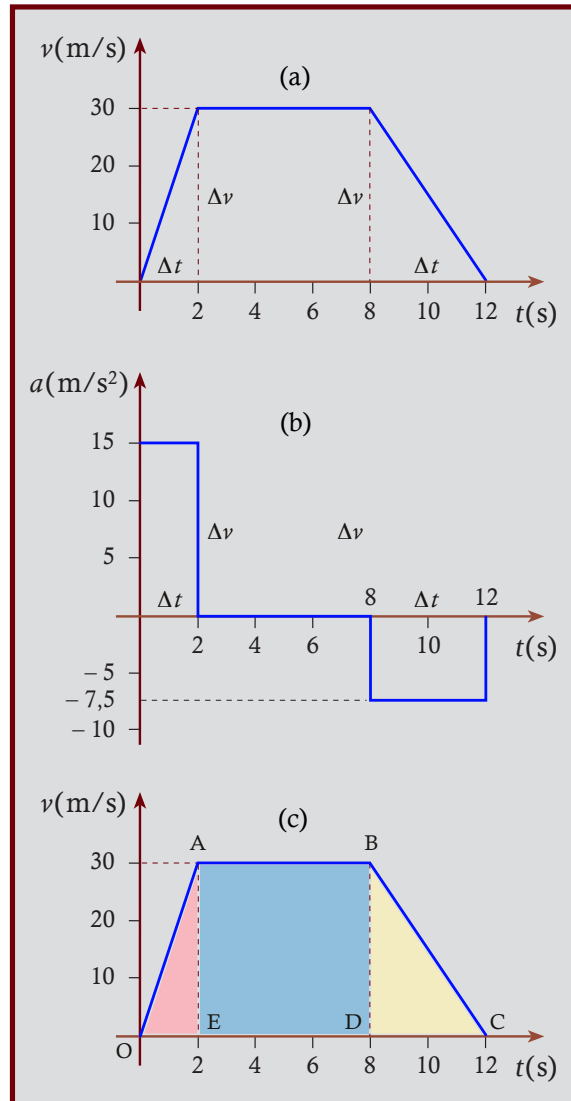


Fig. 5.14 Ejemplo 5.7.

$8 \leq t < 12$: Distancia = Área del triángulo BCD

$$\text{Área} = \frac{1}{2} \cdot (12 - 8) \text{ s} \cdot (30 - 0) \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 30 \text{ m} = 60 \text{ m}$$

Luego, la distancia total recorrida es:

$$x = (30 + 180 + 60) \text{ m} = 270 \text{ m}$$



PIENSA Y EXPLICA

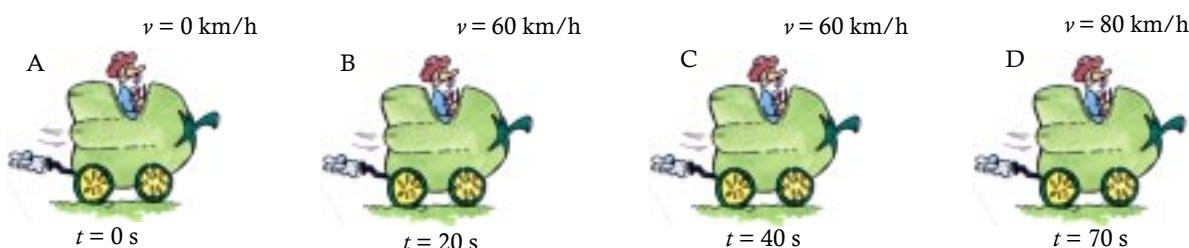


- 5.1** ¿Cuándo un objeto en movimiento experimenta una aceleración?
- 5.2** ¿Cuándo un movimiento es acelerado? ¿Cuándo es retardado?
- 5.3** Si una persona va en un vehículo, ¿cómo siente el efecto de la aceleración?
- 5.4** ¿Cuál es la aceleración de un automóvil que se mueve en línea recta, a una velocidad constante de 80 km/h?
- 5.5** ¿Por qué un objeto puede acelerar si se mueve con una rapidez constante, pero no puede acelerar si se mueve con velocidad constante?
- 5.6** ¿Cuál es la aceleración de la luz?
- 5.7** ¿Bajo qué condiciones la aceleración es nula?
- 5.8** ¿Define aceleración media y aceleración instantánea?
- 5.9** ¿En qué unidades se expresa la aceleración? ¿Cuál es el significado físico de estas unidades?
- 5.10** Si un móvil tiene una alta rapidez, ¿tendrá una gran aceleración?
- 5.11** Si la velocidad de un objeto es positiva, ¿puede ser su aceleración negativa?

- 5.12** ¿Puedes citar un ejemplo donde tanto la velocidad como la aceleración sean negativas?
- 5.13** Usualmente, al pedal o “la chola” de un vehículo se le conoce como acelerador. Si alguien afirma que los frenos y el volante son, también, aceleradores, ¿está en lo cierto?
- 5.14** A medida que aumentan las velocidades entre dos vehículos que se mueven en línea recta, es aconsejable aumentar la distancia entre los mismos ¿Por qué es prudente hacerlo?
- 5.15** Un objeto se mueve con velocidad y aceleración negativas. ¿Permanecerá siempre la velocidad negativa?
- 5.16** Explica qué es una velocidad negativa y qué es una aceleración negativa.
- 5.17** ¿Cuándo un móvil posee aceleración uniforme?
- 5.18** ¿Es la aceleración una cantidad vectorial?
- 5.19** Explica por qué en el movimiento uniformemente acelerado la aceleración es igual a la aceleración media.
- 5.20** Escribe las relaciones que describen el movimiento uniformemente acelerado y el movimiento uniformemente retardado.
- 5.21** La variación de la velocidad con el tiempo, para el movimiento uniformemente acelerado con velocidad inicial nula, es $v = at$. Si un atleta de pista corre durante mucho tiempo, ¿su velocidad se hace muy grande?
- 5.22** ¿Pueden las ecuaciones del movimiento acelerado, dadas en este capítulo, explicar el movimiento de un árbol sometido a la acción del viento?
- 5.23** ¿Cómo es el gráfico aceleración - tiempo para el movimiento uniformemente acelerado? ¿Para el movimiento uniformemente retardado?
- 5.24** ¿Cuál de las siguientes cantidades cambia uniformemente en el movimiento uniformemente acelerado: a) La distancia recorrida, b) La velocidad, c) La distancia recorrida y la velocidad?
- 5.25** ¿Es cierto que un móvil con aceleración negativa siempre bajará el módulo de su velocidad?

**PROBLEMAS**

- 5.1** Un automóvil que se mueve en línea recta, cambia su velocidad desde cero hasta 80 km/h en 8 s. ¿Cuál es su aceleración?
- 5.2** ¿Cuál es el cambio de la velocidad de un vehículo cada segundo, cuando se mueve en línea recta con una aceleración de 5 km/h por segundo?
- 5.3** Un vehículo parte del reposo y se mueve de acuerdo al dibujo de la fig . 5.15. Determina la aceleración en los distintos intervalos.

**Fig. 5.15 Problema 5.3.**

- 5.4** El conductor de un camión está detenido ante la luz roja de un semáforo. Cuando se produce el cambio a luz verde, arranca y mantiene una aceleración de 5 m/s^2 durante 10 segundos. Determina la distancia recorrida durante este tiempo.
- 5.5** Una aeronave parte del reposo sobre una pista de 400 m de longitud. Si mantiene una aceleración constante y despegue en 25 segundos, ¿cuál es la velocidad de despegue?
- 5.6** Una lancha se mueve en línea recta, cambiando su velocidad de 80 km/h a 20 km/h en una distancia de 60 m. ¿Cuál es su aceleración?
- 5.7** Un delfín aumenta su velocidad uniformemente desde 1 m/s hasta 10 m/s, en un tiempo de 6 segundos. ¿Cuál es su aceleración media? ¿Qué distancia recorre durante ese tiempo?
- 5.8** Un objeto que parte del reposo recorre 80 m durante el quinto segundo de su desplazamiento en línea recta. Si la aceleración se mantuvo constante, ¿cuál fue su valor?

- 5.9** Un guepardo africano se lanza a correr, desde el reposo, con una aceleración constante de 7 m/s^2 , para capturar una gacela que está a 15 m de distancia. En ese mismo momento, la gacela comienza a huir con una aceleración de $3,8 \text{ m/s}^2$. **a)** ¿Cuánto tardará el guepardo en atrapar a la gacela? **b)** ¿Qué distancia habrá recorrido la gacela en el instante cuando es atrapada? **c)** ¿Qué velocidad tendrán ambos animales al producirse el encuentro?
- 5.10** Un automóvil que parte del reposo, alcanza una velocidad de 100 km/h en 10 s a lo largo de una pista recta. **a)** ¿Cuál es su aceleración media? **b)** ¿Cuál es la velocidad media del automóvil?
- 5.11** Un objeto se mueve en la dirección negativa del eje de las X con una velocidad igual a $-5 \vec{i} \text{ m/s}$. Si experimenta una aceleración positiva de 1 m/s^2 en la dirección positiva del eje X , ¿cuánto tiempo tardará para empezar a devolverse?
- 5.12** Un automóvil parte del reposo y acelera uniformemente a 5 m/s^2 . **a)** ¿Qué distancia recorre en 6 s ? **b)** ¿Qué velocidad alcanza en ese tiempo?
- 5.13** Un vehículo se desplaza a 80 km/h . El conductor aplica los frenos y se produce una desaceleración de 8 m/s^2 . **a)** ¿Cuánto tiempo tardará en detenerse? **b)** ¿Qué distancia recorre hasta detenerse?
- 5.14** Un conductor de vehículos de carrera utiliza un paracaídas para detener la marcha de su carro. Cuando viaja a 250 km/h , usa este procedimiento y disminuye su velocidad uniformemente hasta alcanzar 20 km/h en 15 s . ¿Cuál fue la aceleración del vehículo? ¿Qué distancia recorrió?
- 5.15** Un automóvil que viaja a 100 km/h en una carretera recta, se detiene uniformemente en 20 s al aplicar los frenos. ¿Qué distancia recorrió?
- 5.16** Conducir cuando la vía está mojada, aumenta la probabilidad de accidentes. Mientras que en un pavimento seco un carro puede desacelerar a 6 m/s^2 , en uno mojado la desaceleración máxima es cerca de la mitad de ese valor (3 m/s^2). Si el tiempo de reacción de un conductor es de $0,7 \text{ s}$, **a)** ¿Qué distancia recorrerá al aplicar los frenos si viaja a 70 km/h en pavimento seco? **b)** ¿En pavimento húmedo?



Cuando la vía está húmeda, hay que conducir con mucha precaución para evitar accidentes.

- 5.17** El conductor de un autobús viaja a una velocidad de 80 km/h y observa que, a 40 m del vehículo, hay un aviso que obliga a reducir la velocidad a 30 km/h. ¿Cuál debe ser su aceleración para llegar, con esta última velocidad, al sitio donde está el aviso?
- 5.18** Un auto, a una velocidad no permitida de 120 km/h, pasa a una patrulla policial que se mueve a 90 km/h. El infractor sin percatarse de la presencia de la patrulla, mantiene su velocidad constante. El conductor de la patrulla pisa el acelerador 2 s después que pasa el auto y acelera a 4 m/s^2 . ¿Cuánto tiempo, después de pasar a la patrulla, tardará ésta en alcanzar al infractor?



- 5.19** Un automóvil y un autobús parten en el mismo instante estando el autobús a cierta distancia delante del automóvil. Este último acelera 2 m/s^2 mientras que el autobús tiene una aceleración de $1,2 \text{ m/s}^2$. El automóvil alcanza al bus a los 40 m, desde donde parte este último. a) ¿Cuánto tarda el automóvil en alcanzar al autobús? b) ¿Cuál es la velocidad de ambos vehículos al encontrarse? c) ¿Cuál es la distancia inicial entre ambos vehículos?

- 5.20** En la fig. 5.16 se muestra el gráfico $v - t$ de un objeto en movimiento. a) ¿En qué intervalo de tiempo el movimiento es acelerado o retardado? b) ¿En qué intervalo de tiempo el movimiento es uniforme? c) ¿Qué valores adquiere la aceleración durante el tiempo que dura el movimiento? d) ¿Cuál es la distancia recorrida en los primeros 6 s? e) ¿Cuál es la distancia total recorrida? f) Dibuja el gráfico $a - t$.

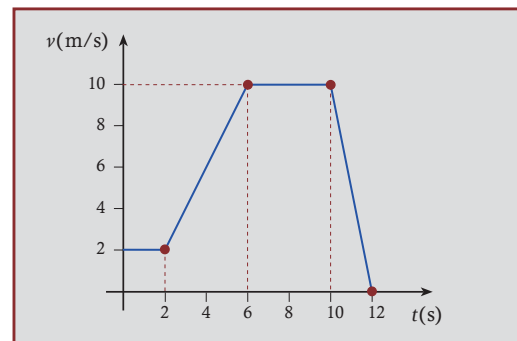


Fig. 5.16 Problema 5.20.

5.5 CAÍDA LIBRE

Cuando un objeto se deja caer desde cierta altura, éste se dirigirá hacia la superficie terrestre. Tan acostumbrados estamos a este fenómeno que, muchas veces, no nos preguntamos las causas del mismo. De igual forma, si se lanza un objeto verticalmente hacia arriba, tenemos la certeza de que regresará al sitio desde donde fue lanzado. La intuición nos dice, entonces, que todo lo que sube debe bajar. Aun cuando en la mayoría de los casos el fenómeno se repite irremediablemente, no siempre esto se cumple. Por ejemplo, cuando se lanza un cohete hacia arriba con la velocidad apropiada, el mismo puede alejarse del planeta Tierra y, tal vez, no regrese de nuevo.

¿Cuál es la causa por la cual un objeto lanzado hacia arriba vuelve a la Tierra? Durante mucho tiempo no se sabía la razón de este fenómeno físico. Actualmente, se sabe que es la llamada *fuerza de gravedad*, la cual actúa sobre cualquier objeto cercano a la superficie terrestre. Esta fuerza produce una aceleración, aproximadamente constante, denominada *aceleración gravitacional* o, más comúnmente, *gravedad*, la cual obliga a cualquier cuerpo lanzado hacia arriba a volver al sitio desde donde fue lanzado.

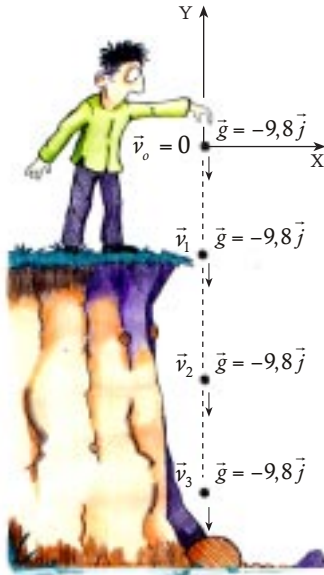
La aceleración debida a la fuerza de la gravedad se expresa mediante la letra g , está dirigida hacia el centro de la Tierra y tiene una magnitud dada, aproximadamente, por:

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2 \quad (5.14)$$

El valor anterior establece que un cuerpo lanzado sobre la superficie terrestre cambia su velocidad $9,8 \text{ m/s}$ cada segundo. Como la aceleración es un vector, si se traza un eje de coordenadas rectangulares con el eje Y hacia arriba sobre el punto de la superficie terrestre desde donde se hace la observación, la expresión vectorial de la misma será:

$$\vec{g} = -9,8 \vec{j} \text{ m/s}^2 \quad (5.15)$$

En la fig. 5.17 se hace una representación gráfica de este vector. Mientras que la magnitud de la aceleración permanece constante e igual a 9.8 m/s^2 , la velocidad aumenta a medida que el cuerpo cae. La magnitud de la aceleración de un objeto cuando cae, depende de factores tales como la altura del objeto sobre la superficie terrestre y la resistencia del aire. Si la resistencia del aire puede despreciarse y el objeto está cercano a la Tierra, cae con una aceleración de $9,8 \text{ m/s}^2$ debida a la fuerza gravitacional. A menudo, el valor de g se aproxima a 10 m/s^2 para facilitar los cálculos:



$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$(5.16)$$

Estrictamente hablando, el concepto de caída libre se aplicaría a los cuerpos que se dejan caer sólo bajo la influencia de la g gravedad desde cierta altura, sin velocidad inicial y sin tomar en cuenta la resistencia del aire. Sin embargo, *es usual usar el término caída libre para cualquier movimiento que se realice bajo la influencia de la gravedad, siempre y cuando se desprecie la resistencia del aire.*

5.17 Un objeto que cae libremente, experimenta una aceleración constante y de magnitud igual a $9,8 \text{ m/s}^2$. La velocidad del objeto aumenta durante la caída.

Es interesante mencionar que el famoso filósofo griego Aristóteles sostenía que los cuerpos pesados caían más rápidamente que los cuerpos livianos. Parece lógico pensar que esto suceda así. Lo anterior supone que la aceleración ejercida sobre un cuerpo pesado es distinta a aquella correspondiente a un cuerpo liviano. Esta afirmación, por provenir de una autoridad tan reconocida como Aristóteles, oscureció por 2.000 años la posibilidad de avances importantes en la Física. Otra vez, la intuición frenaba el avance de las ciencias. Bastó la chispa genial de Galileo para desbaratar tal afirmación. Lo que parecía respaldar la teoría de Aristóteles era la observación de la caída libre de cuerpos livianos, como una pluma, en contraste con cuerpos más pesados, como una moneda. En efecto, la pluma permanece en el aire por más tiempo que la moneda. No se percataba Aristóteles que la resistencia del aire a la caída de la pluma era la responsable por su lento descenso. Galileo aseguraba que dicha resistencia actuaba para detener a los cuerpos más livianos y que, en ausencia de la misma, todos los cuerpos tardaban el mismo tiempo en bajar desde una determinada altura. Entonces, si no existiera la resistencia del aire, veríamos caer simultáneamente tanto la pluma como la moneda. En efecto, en el vacío, donde el aire no está presente, ambos cuerpos caerían simultáneamente si se dejan caer desde la misma altura. En la fig. 5.18 se ilustra esta situación.

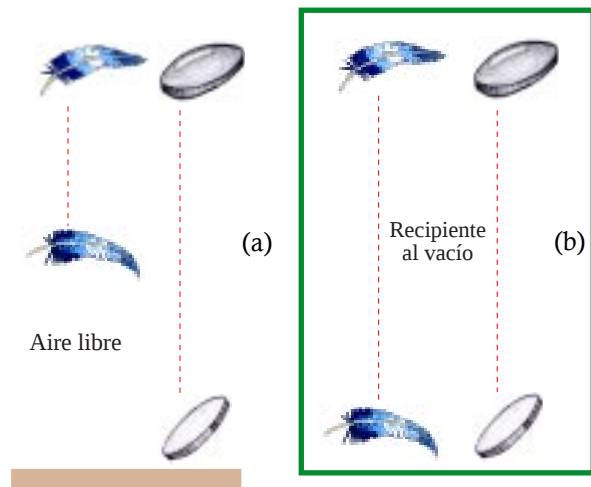


Fig. 5.18 a) En el aire una moneda cae más rápidamente que una pluma. b) En el vacío, sin aire presente, ambos objetos caen simultáneamente.

Una comprobación dramática de lo afirmado por Galileo tuvo lugar en la Luna, cuando el astronauta David Scott, en 1971, dejó caer simultáneamente una pluma y un martillo. La Luna no posee atmósfera, por lo que no existe fuerza de rozamiento, debida al aire, que se oponga a la caída de cualquier objeto. ¡Ambos cuerpos, el martillo y la pluma, alcanzaron la superficie lunar al mismo tiempo! La aceleración de gravedad en la Luna es aproximadamente igual a $1/6$ de la aceleración de gravedad en la Tierra, por lo que el tiempo de caída es mayor para ambos cuerpos en la Luna.

5.6 CAÍDA LIBRE SIN VELOCIDAD INICIAL

Si se deja caer un objeto desde una altura y con una velocidad inicial nula ($v_0 = 0$), su velocidad y posición a cada instante de tiempo pueden calcularse mediante las relaciones correspondientes al movimiento uniformemente acelerado, con la aceleración, a , sustituida por la aceleración de gravedad, g , y la distancia, x , reemplazada por la altura h . En la fig 5.19 se ilustra este caso: un coco se desprende desde lo alto de un cocotero y cae verticalmente hacia la superficie terrestre. La velocidad del coco aumenta, a medida que desciende en caída libre bajo la acción de la gravedad. Tanto la velocidad como la aceleración son vectores en el sentido negativo del eje Y . Asimismo, la aceleración de la gravedad también es un vector dirigido en el sentido negativo del eje Y . Ambos, pueden expresarse como:

$$\vec{g} = -g\vec{j} \quad v = -v\vec{j}$$

Donde v y g son las magnitudes de la velocidad y de la aceleración de gravedad y el vector $-\vec{j}$ indica la dirección de los vectores $\vec{v}$ y $\vec{g}$. Las expresiones para el movimiento uniformemente acelerado y el movimiento en caída libre con $v_0 = 0$ son:

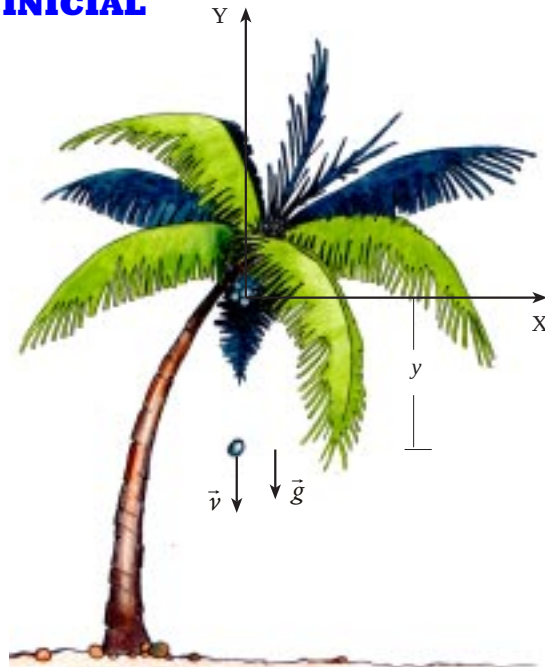


Fig. 5.19 Un coco se desprende de un cocotero e inicia un movimiento en caída libre con $v_0 = 0$. El origen del sistema de coordenadas se coloca en el punto donde comienza el movimiento.

Movimiento Uniformemente Acelerado	Movimiento en Caída Libre
$\vec{v} = \vec{a}t$	$\vec{v} = \vec{g}t = -gt\vec{j}$
$\vec{x} = \frac{1}{2}\vec{a}t^2$	$\vec{y} = \frac{1}{2}\vec{g}t^2 = -\frac{1}{2}gt^2\vec{j}$

Observa que el desplazamiento está también expresado como un vector. Como el movimiento en caída libre es unidimensional, prescindiremos de la notación vectorial y las ecuaciones para el movimiento en caída libre se pueden escribir como:

$$v = gt \quad (5.17)$$

$$y = \frac{1}{2} gt^2 \quad (5.18)$$

relaciones que corresponden a las magnitudes de la velocidad, $\vec{v}$, y del desplazamiento, $\vec{y}$, respectivamente. Cuando hagamos uso de las relaciones (5.17) y (5.18) debemos tener presente que, tanto la velocidad como el desplazamiento, están dirigidos hacia abajo. Si despejamos t de (5.17) y sustituimos en (5.18) obtenemos:

$$t = \frac{v}{g} \quad y = \frac{1}{2} g \left(\frac{v}{g} \right)^2 = \frac{1}{2} g \frac{v^2}{g^2} = \frac{1}{2} \frac{v^2}{g} \Rightarrow y = \frac{1}{2} \frac{v^2}{g}$$

Finalmente:

$$v^2 = 2gy \Rightarrow v = \sqrt{2gy} \quad (5.19)$$

Ejemplo 5.8

El hombre se ha convertido en el depredador más persistente de nuestra naturaleza, bien sea contaminando el medio ambiente o provocando la extinción de muchas especies. Muchos animales han desaparecido de la faz de la Tierra como consecuencia de esta acción devastadora. En la fig. 5.20 se muestra a un cazador disparando contra una bandada de gaviotas, que vuela a unos 50 m de altura. Una de las gaviotas cae herida y se desprende en caída libre de la manada. a) ¿Qué distancia recorre el ave y qué velocidad alcanza a $t = 1, 2, 3$ s b) ¿Cuánto tiempo y qué velocidad tiene la gaviota al chocar contra la superficie terrestre? c) Dibuja gráficos de la velocidad y de la distancia recorrida por la gaviota herida. En el caso de la distancia, dibuja el gráfico tomando como referencia tanto la altura a la cual volaba la bandada (50 m) como la altura sobre la superficie terrestre. d) ¿Cuál puede ser la consecuencia de la acción del cazador?

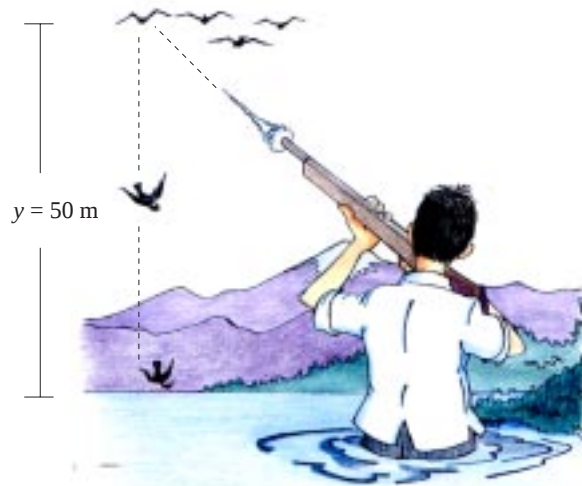


Fig. 5.20 Un cazador dispara contra una bandada de gaviotas. La acción tiene implicaciones desde el punto de vista de la Física y de la Ecología.

Solución

Utilizaremos las relaciones (5.17), (5.18) y (5.19) para resolver este problema, tomando en cuenta que cuando el ave comienza a caer, su velocidad vertical inicial es igual a cero ($v_0 = 0$). Asumiremos un valor de $g = 10 \text{ m/s}^2$.

$$\begin{aligned} \text{a) } t = 1 \text{ s: } \quad v &= 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ s} = 10 \text{ m/s} & y &= \frac{1}{2} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ s}^2 = 5 \text{ m} \\ t = 2 \text{ s} \quad v &= 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2 \text{ s} = 20 \text{ m/s} & y &= \frac{1}{2} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 4 \text{ s}^2 = 20 \text{ m} \\ t = 3 \text{ s} \quad v &= 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 3 \text{ s} = 30 \text{ m/s} & y &= \frac{1}{2} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 9 \text{ s}^2 = 45 \text{ m} \end{aligned}$$

b) Despejando t de la relación (5.18) obtenemos el tiempo que tarda el ave en chocar contra la superficie terrestre:

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50 \text{ m}}{10 \text{ m/s}^2}} = \sqrt{\frac{100}{10} \text{ s}^2} = \sqrt{10} \text{ s} = 3,16 \text{ s}$$

La velocidad, al final de la caída libre, se puede calcular mediante las relaciones (5.17) o (5.19). Si usamos (5.17) con $t = 3,16 \text{ s}$, la velocidad al llegar a la superficie terrestre es:

$$v = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 3,16 \text{ s} = 31,6 \text{ m/s}$$

Si utilizamos (5.19):

$$v = \sqrt{2 \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 50 \text{ m}} = \sqrt{1.000 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 31,6 \text{ m/s}$$

En cualesquiera de los dos casos, los resultados coinciden.

c) De acuerdo con los resultados anteriores la tabla 5.1 muestra los valores de la velocidad y de la distancia recorrida en función del tiempo. En la Fig. 5.21 se muestran los gráficos correspondientes.

$t(\text{s})$	Velocidad alcanzada	Distancia con respecto a la altura de la bandada	Distancia con respecto a la superficie terrestre
0	0	0	50
1	10	5	45
2	20	20	30
3	30	45	5
3,16	31,6	50	0

Tabla 5.1.

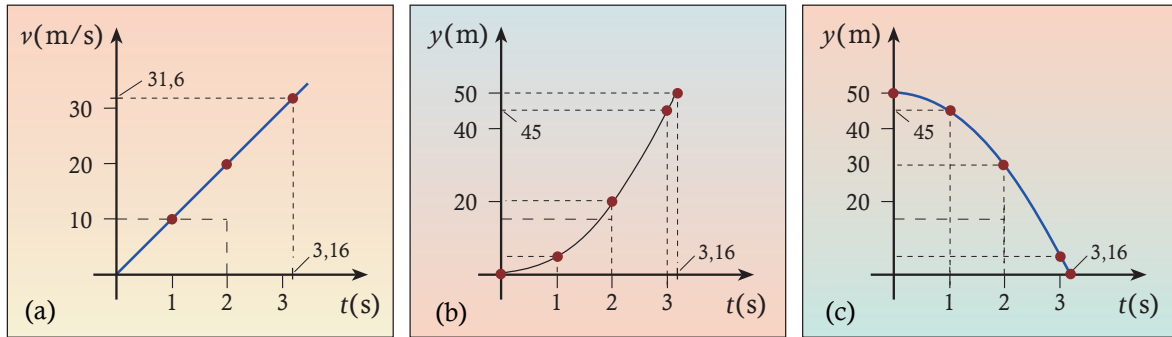


Fig. 5.21 Gráficos de: a) La velocidad del ave. b) La distancia recorrida por el ave. c) La altura del ave sobre la superficie terrestre. Ejemplo 5.8.

Como puede observarse de la fig 5.21, la velocidad del ave al caer aumenta con el tiempo en forma lineal, mientras que la distancia recorrida obedece a una relación cuadrática, no lineal, ($y = 1/2gt^2$), correspondiente a una parábola.

d) La acción del cazador se inscribe dentro del proceso de deterioro de nuestros valores. El deseo de matar por divertirse, ocasiona tanto daños morales como daños a la misma supervivencia de la especie humana. La cadena ecológica, violentada por la irresponsabilidad del hombre, puede dar origen a la destrucción de los ecosistemas.



2,10 m



Fig. 5.22 Ejemplo 5.9.

Ejemplo 5.9

El agua es un recurso natural de gran importancia. De allí la recomendación de no malgastarlo y de evitar las fugas de este líquido en nuestros hogares. En la fig 5.22, una llave defectuosa de una ducha origina un goteo permanente. El agua es recogida por un envase de 0,5 litros. El tiempo de formación de una gota es de, aproximadamente, 0,2 s y, en promedio, el diámetro de las mismas es de 0,5 cm. ¿En cuánto tiempo se llenará el balde?

Solución

El volumen de una gota, suponiendo que es completamente esférica, está dado por:

$$\text{Volumen de gota} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

Donde r es el radio de la gota. Como el diámetro es 0,5 cm, el radio es 0,25 cm. Sustituyendo en la fórmula anterior:

$$\text{Volumen de gota} = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot (0,25)^3 = 0,065 \text{ cm}^3$$

Como el volumen del balde es 0,50 litros, equivalente a $0,50 \text{ dm}^3$ o a 500 cm^3 , el número de gotas necesario para llenar el balde es:

$$n = \frac{500 \text{ cm}^3}{0,065 \text{ cm}^3} = 7.692 \text{ gotas}$$

De acuerdo con el enunciado del problema, una gota tarda en formarse 0,2 s y el tiempo que tarda en caer desde una altura de 2,10 m está dado por:

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2,10 \text{ m}}{10 \text{ m/s}^2}} = \sqrt{0,42 \text{ s}^2} = 0,65 \text{ s}$$

El tiempo total (formación + caída) para una gota es:

$$t_T = (0,2 + 0,65) \text{ s} = 0,85 \text{ s}$$

Para 7.692 gotas el tiempo de caída está dado por:

$$T = 7.692 \cdot 0,85 \text{ s} = 6.538,2 \text{ s}$$

Lo que equivale a 1,82 h o, también, a 1 h y 49 minutos.

Ejemplo 5.10

La costumbre de jugar carnaval, usando bombitas llenas de agua, puede convertirse en una acción peligrosa. El golpe de la bombita o salir corriendo para escapar de ellas son, aparte de otros incidentes que pueden presentarse, algunas consecuencias inconvenientes. El joven de la fig. 5.23, montado en un edificio de 12 m de altura, viene a un transeúnte de altura 1,70 m. Éste camina en línea recta a una velocidad constante de 2 m/s. El joven deja caer una bombita llena de agua, cuando el transeúnte está a 1 m alejado de la vertical que va desde la acera hasta la parte superior del inmueble, tal como se muestra en la fig. 5.23. **a)** ¿Le caerá la bombita de agua al transeúnte? **b)** ¿A qué distancia, del transeúnte a la vertical, debe encontrarse éste para que la bombita le caiga encima?

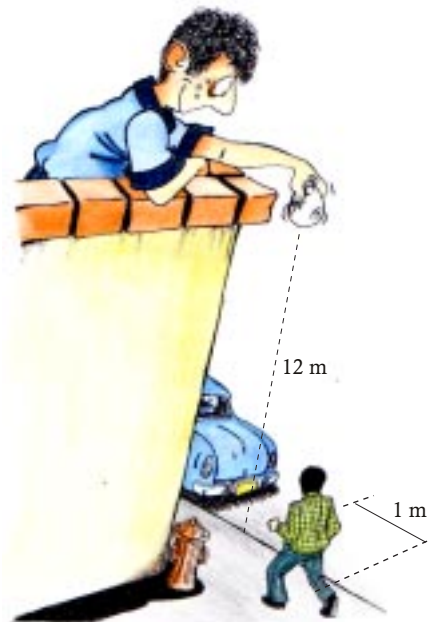


Fig. 5.23 ¿Le caerá la bombita de agua al transeúnte? Ejemplo 5.10.

Solución

a) Dado que el transeúnte mide 1,70 m, el tiempo que tarda la bombita en cubrir la distancia de $(12 - 1,70) \text{ m} = 10,30 \text{ m}$, está dado por:

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10,30 \text{ m}}{10 \text{ m/s}^2}} = \sqrt{2,06 \text{ s}^2} = 1,44 \text{ s}$$

Durante este tiempo el transeúnte recorre la distancia:

$$x = vt = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,44 \text{ s} = 2,88 \text{ m} \quad (\text{Mayor que 1 m})$$

Lo que indica que el hombre pasó por el punto donde cayó la bombita de agua, sin que ésta lo alcanzara.

c) Para que la bombita de agua le caiga al transeúnte es necesario que el tiempo que tarda la misma en caer sea igual al tiempo que tarda el transeúnte en cubrir la distancia de 1 m:

$$\sqrt{\frac{2y}{g}} = \frac{x}{v} \quad \Rightarrow \quad x = v \sqrt{\frac{2y}{g}}$$

Sustituyendo valores:

$$x = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10,30 \text{ m}}{10 \text{ m/s}^2}} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{2,06 \text{ s}^2} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,44 \text{ s} = 2,88 \text{ m}$$

Es decir, el hombre debe estar a una distancia de 2,86 m de la vertical para que, a la velocidad de 2 m/s, pueda ser alcanzado por la bombita de agua.

5.7 LANZAMIENTO VERTICAL HACIA ABAJO

Cuando un objeto se lanza verticalmente hacia abajo con una velocidad inicial distinta de cero ($v_o \neq 0$), las relaciones que se utilizan para describir el movimiento son las siguientes:

$$\text{Distancia recorrida: } y = v_o t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (5.20)$$

$$\text{Velocidad: } v = v_o + g t \quad (5.21)$$

Eliminando t entre las relaciones anteriores, se obtiene una ecuación similar a la (5.10):

$$v^2 = v_o^2 + 2 g y \quad (5.22)$$

Ejemplo 5.11

Una pelota es lanzada verticalmente hacia abajo desde lo alto de un edificio de altura 50 m, con una velocidad inicial de 10 m/s. **a)** Calcula el tiempo que tarda en chocar contra el suelo. **b)** ¿Cuál es su velocidad al chocar contra el suelo. **c)** Dibuja la posición de la pelota para $t = 0,5$; 1; 1,5 y 2 s.

Solución

a) Usando la relación (5.20):

$$y = v_o t + \frac{1}{2} g t^2 \Rightarrow 50 = 10t + 5t^2 \Rightarrow 5t^2 + 10t - 50 = 0 \Rightarrow t^2 + 2t - 10 = 0$$

Resolviendo la ecuación de segundo grado:

$$t = \frac{-2 \pm \sqrt{4 + 40}}{2} = \frac{-2 \pm \sqrt{44}}{2} = \frac{-2 \pm 6,63}{2}$$

Tomando el valor positivo para t :

$$t = \frac{-2 + 6,63}{2} = \frac{4,63}{2} = 2,32 \text{ s}$$

b) Para calcular la velocidad de la pelota al chocar contra el suelo usamos la relación (5.21) con $t = 2,32$ s:

$$v = v_o + gt \Rightarrow v = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2,32 \text{ s} = (10 + 23,2) \frac{\text{m}}{\text{s}} = 33,2 \text{ m/s}$$

c) Mediante la relación (5.20), calculamos la distancia recorrida por la pelota para los tiempos pedidos ($y = 10t + 5t^2$):

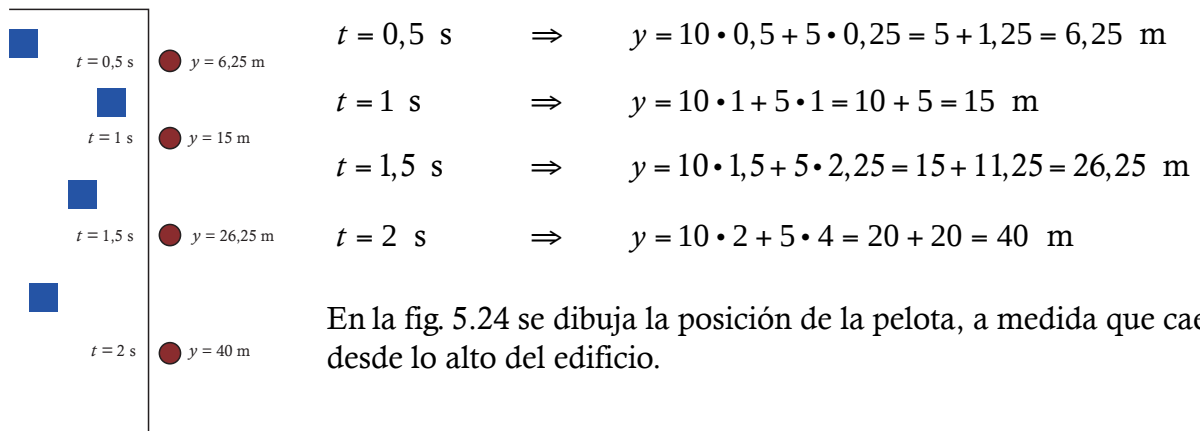


Fig. 5.24 Posición de la pelota que cae para el ejemplo 5.11.

5.8 LANZAMIENTO VERTICAL HACIA ARRIBA

Es conocido que, al lanzar un cuerpo verticalmente hacia arriba, éste, usualmente, regresa a la superficie terrestre. Es la gravedad la responsable de este fenómeno. Para que un objeto se eleve es necesario que al mismo se le imprima una velocidad inicial. Una vez lanzado, el objeto sube, alcanza una *altura máxima*, se detiene ($v = 0$) y, luego, regresa al sitio desde donde fue lanzado.

En la fig. 5.25 se muestra una aproximación a la trayectoria de un objeto lanzado verticalmente hacia arriba con una velocidad inicial de magnitud v_o . Durante el ascenso, la velocidad del objeto va disminuyendo con la altura hasta llegar a su máxima posición ($y = y_m$) donde la velocidad es nula ($v = 0$). Para esta parte del movimiento, el vector velocidad está dirigido hacia arriba, mientras que el vector correspondiente a la aceleración de la gravedad tiene dirección hacia abajo.

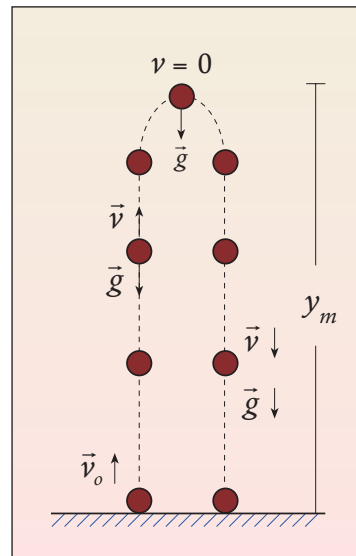


Fig. 5.25 Trayectoria de un objeto lanzado hacia arriba. El origen de coordenadas está en el piso

Es esta acción de la gravedad la responsable de que la velocidad del objeto disminuya. Cuando alcanza su altura máxima, la velocidad se reduce a cero. Las relaciones que describen el movimiento ascendente son:

$$y = v_o t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (5.23)$$

$$v = v_o - g t \quad (5.24)$$

$$v^2 = v_o^2 - 2 g y \quad (5.25)$$

La altura máxima alcanzada por el objeto y_m , puede calcularse tomando en consideración que en esta posición $v = 0$. Usando (5.25):

$$v = 0 \Rightarrow 0 = v_o^2 - 2 g y_m \Rightarrow 2 g y_m = v_o^2 \Rightarrow y_m = \frac{v_o^2}{2 g} \quad (5.26)$$

El tiempo necesario para alcanzar esta altura, conocido como *tiempo máximo* (t_m) puede calcularse de (5.24) con $v = 0$:

$$t_m = \frac{v_o}{g} \quad (5.27)$$

Una vez que el objeto alcanza su altura máxima y comienza a descender, la trayectoria corresponde a un movimiento en caída libre con velocidad inicial nula ($v_o = 0$). En este

caso, el origen de coordenadas se ubica en el punto máximo de la trayectoria y la velocidad aumenta a medida que el objeto cae, ya que la aceleración de gravedad tiene la misma dirección que la velocidad. Las ecuaciones que se aplican durante el descenso, ya las hemos estudiado:

$$y = \frac{1}{2}gt^2 \qquad v = gt \qquad v^2 = 2gy$$

Es importante resaltar que, en ausencia de la resistencia del aire, el tiempo empleado por el objeto en subir es exactamente el mismo que el tiempo empleado en bajar. Más aún, la velocidad en cualquier punto de la trayectoria es exactamente la misma tanto en el movimiento ascendente, como en el descendente.

Ejemplo 5.12

Una pelota es lanzada desde lo alto de un edificio como se muestra en la fig. 5.26. La velocidad inicial de la pelota es de 10 m/s. Calcula: **a)** La altura máxima que alcanza la pelota. **b)** El tiempo que tarda en llegar al suelo **c)** La velocidad con la cual choca contra el suelo.

Solución

a) La altura máxima es:

$$y_m = \frac{v_o^2}{2g} = \frac{(10 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 10 \text{ m/s}^2} = \frac{100 \text{ m}^2/\text{s}^2}{20 \text{ m/s}^2} = 5 \text{ m}$$

b) El tiempo que tarda en llegar al suelo es igual al tiempo que tarda en alcanzar la altura máxima (t_m) más el tiempo en caída libre:

$$t_m = \frac{v_o}{g} = \frac{10 \text{ m/s}}{10 \text{ m/s}^2} = 1 \text{ s}$$

La distancia recorrida por la pelota desde su punto más alto hasta que choca contra el suelo es:

$$y = y_m + 20 = 5 \text{ m} + 20 \text{ m} = 25 \text{ m}$$

Como $y = 1/2gt^2$:

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 25 \text{ m}}{10 \text{ m/s}^2}} = \sqrt{5 \text{ s}^2} = 2,24 \text{ s}$$

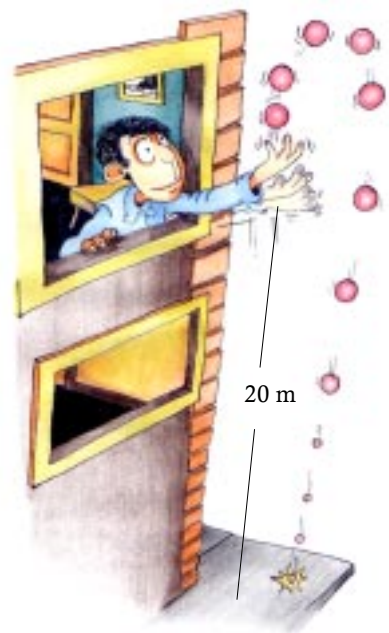


Fig. 5.26 Ejemplo 5.12.

Luego :

$$t_{Total} = 1 \text{ s} + 2,24 \text{ s} = 3,24 \text{ s}$$

c) La velocidad con la cual choca contra el suelo es:

$$v = \sqrt{2gy} = \sqrt{2 \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 25 \text{ m}} = \sqrt{500 \text{ m}^2/\text{s}^2} = 22,36 \text{ m/s}$$



PIENSA Y EXPLICA



- 5.26** ¿Qué es la gravedad? ¿Cuál es su valor en lugares cercanos a la superficie terrestre? ¿En qué unidades se expresa?
- 5.27** ¿Cómo se compara la aceleración de gravedad en la Luna con respecto a la gravedad en la Tierra?
- 5.28** ¿Qué dirección tiene la aceleración de gravedad?
- 5.29** ¿De qué factores depende la aceleración de gravedad sobre la superficie terrestre?
- 5.30** Cuando un cuerpo cae libremente, ¿varía su velocidad o su aceleración?
- 5.31** ¿Qué significa la expresión "caída libre"?
- 5.32** ¿Cómo las afirmaciones de Aristóteles, en relación con la caída libre de los cuerpos, frenaron el avance de la Física? ¿Cuál fue el gran aporte de Galileo al respecto?
- 5.33** ¿Por qué una pluma cae más lentamente que una moneda cuando se dejan caer en el aire?
- 5.34** Expresa la aceleración de gravedad como un vector.
- 5.35** Escribe las relaciones que gobiernan la caída libre de un objeto que se deja caer con velocidad inicial nula.

- 5.36** La resistencia del aire, ¿aumenta o disminuye la aceleración de un objeto que cae?
- 5.37** Si se suelta una piedra desde determinada altura: **a)** Aumenta o disminuye su velocidad a medida que cae? **b)** ¿Cuánto varía su velocidad cada segundo de caída?
- 5.38** Se deja caer una piedra desde cierta altura sobre la superficie lunar ¿Cuánto variará la velocidad de la misma cada segundo?
- 5.39** Si un objeto se deja caer libremente, la distancia recorrida cada segundo, ¿permanecerá igual, aumentará o disminuirá?
- 5.40** Si se lanza un objeto hacia arriba, ¿cuáles serán su velocidad y aceleración en el punto más alto del recorrido?



PROBLEMAS



- 5.21** ¿Cuánto tiempo tarda una piedra en llegar al suelo si se lanza desde una altura de 40 m? ¿Cuál es su velocidad al chocar contra el suelo?
- 5.22** Un viajero espacial deja caer un objeto en un planeta desde una altura de 5 m. El objeto cae a la superficie del planeta en 1,2 s ¿Cuál es la aceleración de la gravedad en dicho planeta?
- 5.23** Un coco se desprende desde un cocotero de 12 m de altura. **a)** ¿Con qué velocidad llega al suelo? **b)** ¿Qué tiempo tarda en caer hasta el suelo? **c)** ¿Cuál es su aceleración para $t = 0,5$ s? **d)** ¿Cuál es su velocidad cuando $t = 0,70$ s?
- 5.24** En Marte la aceleración de la gravedad es $3,71 \text{ m/s}^2$. **a)** ¿Cuál será la velocidad de un objeto 2 s después de haber sido dejado caer? **b)** ¿Qué distancia habrá recorrido durante ese tiempo?
- 5.25** Si una persona salta verticalmente hacia arriba con una velocidad de 1,8 m/s, ¿cuánto tardará en volver al suelo? ¿Qué altura alcanzará?

- 5.26** Se lanza una piedra verticalmente hacia abajo con una velocidad inicial de 4 m/s. **a)** ¿Qué distancia recorre en 2 s? **b)** ¿Cuál es su velocidad y aceleración en 2 s?
- 5.27** ¿Con qué velocidad se debe lanzar verticalmente una pelota para alcanzar la altura máxima de 20 m?
- 5.28** Se lanza una pelota de beisbol verticalmente hacia arriba y, luego de 4 s, vuelve a su punto de partida. **a)** ¿Con qué velocidad se lanzó? **b)** ¿Qué altura máxima alcanzó?
- 5.29** Se deja caer una bola desde una altura de 45 m. Simultáneamente, se lanza hacia abajo una piedra con cierta velocidad inicial desde la misma altura. La piedra choca contra el suelo 0,4 s antes que la bola. ¿Con qué velocidad fue lanzada la piedra?
- 5.30** Un balón se lanza verticalmente hacia arriba con una rapidez de 20 m/s **a)** ¿Cuánto tarda en llegar al suelo? **b)** ¿Qué velocidad tiene cuando $t = 1,55$ s?
- 5.31** Un globo asciende verticalmente con una velocidad constante de 4 m/s. Cuando ha ascendido 60 m, se desprende una de sus piezas. ¿Cuánto tiempo tardará esa pieza en llegar al suelo?
- 5.32** Desde un precipicio de 50 m se lanza una piedra verticalmente hacia arriba con una velocidad inicial de 10 m/s **a)** ¿Cuánto tiempo tardará en llegar al fondo del precipicio? **b)** ¿Cuál será su velocidad en ese instante?

CAPÍTULO 6



Primera Ley de Newton

6.1 EL SIGNIFICADO DE FUERZA

La palabra "fuerza" se utiliza en el habla cotidiana para describir situaciones encontradas, comúnmente, en la relación del hombre con su entorno. Muchas son las acepciones en las cuales se emplea el vocablo. Entre ellas, podemos mencionar las siguientes:

Capacidad de acción física: "Es necesario mostrar la fuerza de nuestro ejército"

Vigor, vitalidad: "Ese árbol crece con mucha fuerza"

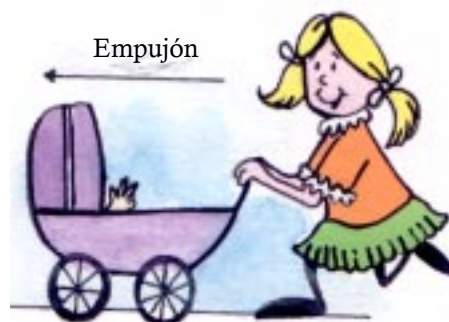
Tenacidad para realizar una labor: "Para escribir hay que tener fuerza de voluntad"

Convicción moral: "Triunfó porque tenía la fuerza de la razón"

Implicaciones económicas: "La fuerza productiva de ese país lo hace vigoroso"

En Física, el concepto de fuerza se define de una forma más restringida. Galileo y Newton lograron separar exitosamente el concepto de fuerza de tendencias, deseos y otros atributos, con los cuales el hombre lo ha adornado. Una posible definición es la siguiente:

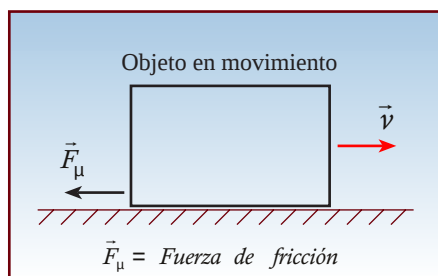
Una fuerza es un jalón o un empujón sobre un objeto que resulta de la interacción con otro objeto, y que es capaz de modificar su estado de movimiento.



La interacción es una acción recíproca entre dos o más objetos. Como resultado de la definición anterior, cada vez que hay una interacción entre dos objetos, se produce una fuerza recíproca entre los mismos. Cuando la interacción desaparece, la fuerza entre ellos cesa. Es decir, *la fuerza sólo se hace presente como consecuencia de una interacción*. A menudo, las fuerzas entre objetos se clasifican en dos amplias categorías:

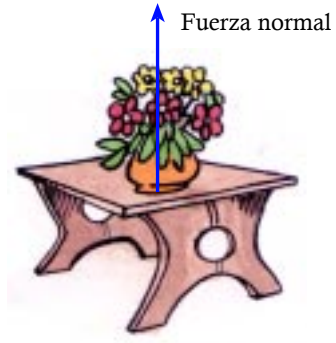
- a. Fuerzas de contacto
- b. Fuerzas de acción a distancia

Las *fuerzas de contacto* son aquellas que se originan cuando los objetos están en contacto entre sí. Ejemplos de estas fuerzas son las siguientes:



Fuerza de fricción: es aquella ejercida por una superficie sobre un objeto que se mueve o trata de moverse sobre la misma. La fuerza de fricción se opone al movimiento del objeto y es el resultado del contacto, a nivel molecular, de las superficies que interaccionan. La fricción está relacionada con la naturaleza de las superficies en contacto y el grado de presión que se ejerce entre ellas. También se le llama *fuerza de roce* o de *rozamiento*.

Fuerza normal: es la fuerza ejercida sobre un objeto que está en contacto con otro objeto en reposo. Generalmente, esta fuerza es perpendicular (o normal) a las superficies en contacto. La fuerza normal soporta el peso de un objeto que descansa sobre la superficie de otro. Por ejemplo, el peso de un jarrón que descansa sobre una mesa es contrarrestado por la fuerza normal que ejerce la superficie de la mesa sobre el jarrón.



Fuerza de tensión: comúnmente se usan cuerdas flexibles (alambres, hilos, etc.) para tirar de un cuerpo. La tensión es una fuerza que se ejerce sobre una cuerda flexible y cuya dirección coincide con la dirección de la misma. Usualmente, se considera que la masa de la cuerda es despreciable en relación con la masa del objeto atado a ella. En las situaciones analizadas en este texto, se considerará que la fuerza de tensión no varía a lo largo de la cuerda. Éstas se considerarán únicamente como un medio para transmitir las fuerzas.

Las *fuerzas de acción a distancia* son aquellas que se originan en objetos que no tienen contacto entre sí. Como ejemplos de estas fuerzas, podemos citar:

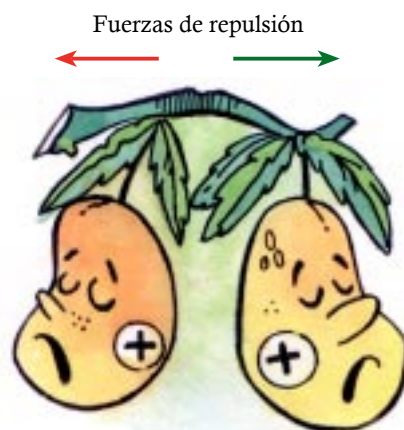
Fuerza de gravedad: es la fuerza con la cual la Tierra, la Luna y otros cuerpos siderales o de gran masa atraen a los objetos que se encuentran en su alrededor. Esta fuerza hace que un cuerpo cercano a la Tierra caiga hacia el centro de la misma. También se le denomina *fuerza gravitatoria* o *fuerza gravitacional*. Hay que enfatizar que la fuerza gravitatoria surge como resultado de la interacción entre dos masas cualesquiera.



Fuerza eléctrica: es aquella que se manifiesta por la atracción o la repulsión entre cuerpos cargados. Estas fuerzas tienen lugar tanto a nivel atómico como a nivel de objetos cargados de dimensiones relativamente grandes y pueden ser de atracción o de repulsión.



Cargas de distintos signos se atraen



Cargas de iguales signos se repelen

La fuerza es una cantidad vectorial que, como tal, posee magnitud y dirección. La magnitud de una fuerza se mide mediante una unidad conocida como el *newton*.

Un newton es la fuerza requerida para producir un cambio de rapidez de 1 m/s, cada segundo, en un cuerpo de masa igual a 1 kg.

El newton se abrevia con la letra **N**. Así, una fuerza de magnitud 20 newtons se escribe como "20 N". En la fig. 6.1 se indican dos fuerzas que actúan sobre un mismo bloque: una trata de arrastrarlo hacia la derecha con un ángulo de 15° sobre la horizontal, mientras que la otra, dirigida en un ángulo de 90° hacia arriba, trata de levantar el bloque. El ángulo que determina la dirección de la fuerza se mide con respecto a la horizontal.

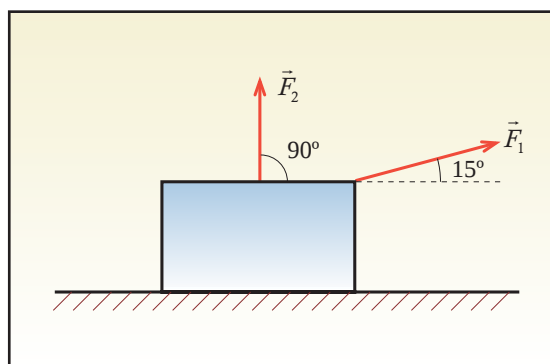


Fig. 6.1 La fuerza es una cantidad vectorial.

6.2 UN ERROR QUE OSCURECIÓ LA FÍSICA POR 2.000 AÑOS

Hay una tendencia intuitiva a pensar que un objeto se mueve sólo si hay una fuerza actuando sobre el mismo. Esta idea tiene su origen en la observación cotidiana del mundo a nuestro alrededor: cualquier cuerpo en movimiento tiene una tendencia natural a alcanzar una posición de reposo. Para ponerlo nuevamente en movimiento, es necesaria la acción de una fuerza externa sobre el cuerpo. Esta observación llevó al gran filósofo

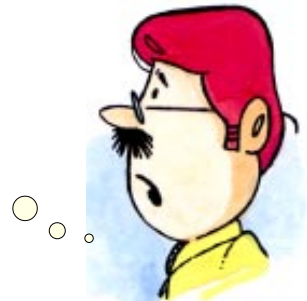
griego Aristóteles a establecer que todo objeto en movimiento eventualmente alcanzará un estado natural de reposo, siendo necesaria la aplicación de una fuerza para mantenerlo en movimiento. Esta conclusión de Aristóteles dominó el pensamiento humano cerca de 2.000 años y fue la causa que impidió avances significativos de la Física durante mucho tiempo.

El razonamiento anterior condujo a la afirmación de que la Tierra no se movía. De acuerdo al mismo, la Tierra había alcanzado su “estado natural” de reposo y, para moverla, dada las dimensiones de la misma, se necesitaba una fuerza difícil de imaginar en magnitud: era obvio que tenía que estar estática.

Fue en ese ambiente intelectual donde el astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473-1543) lanzó su teoría, según la cual la Tierra y otros planetas se movían alrededor del Sol, idea muy controversial en esa época, por las implicaciones religiosas que tenía. Copérnico la mantuvo en secreto para escapar a la Inquisición, tribunal eclesiástico presidido por un obispo, quien se encargaba de la lucha contra la herejía. Las ideas de Copérnico desplazaban al hombre del centro del universo, poniendo en entredicho la teología cristiana.

La idea sobre el movimiento de la Tierra asestaba un duro golpe a lo preconizado por Aristóteles, haciendo tambalear la concepción según la cual el estado natural de un objeto cualquiera era el reposo. Galileo y Newton terminaron con la noción aristotélica que asociaba el reposo con el estado natural de un cuerpo.

La gran autoridad de Aristóteles hizo mantener, por mucho tiempo, la falsa idea de que la Tierra no se movía.



6.3 GALILEO ECHA POR TIERRA LA TEORÍA ARISTÓTELICA

De acuerdo con la teoría aristotélica, el estado natural de cualquier objeto es el reposo y, en consecuencia, según dicha teoría, todo cuerpo en movimiento alcanzará eventualmente ese estado. Según esta corriente del pensamiento humano, para mantener a un objeto en movimiento es necesario que se le aplique una fuerza.

Galileo hizo grandes aportes a la Física. Sin embargo, una de sus más importantes contribuciones fue destruir el concepto aristotélico según el cual era necesaria una fuerza para mantener un objeto en movimiento. Para hacerlo, usó una combinación de experimentación con lógica, materia esta última que tanto utilizó Aristóteles. Para demoler la

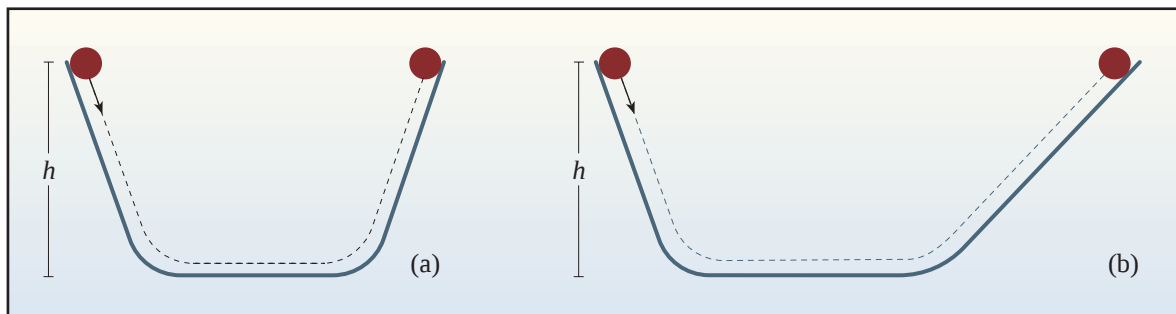


Fig. 6.2. Experimentos de los planos inclinados de Galileo. Si la fricción no existiera, la pelota alcanzaría igual altura en ambos casos.

argumentación aristotélica, Galileo utilizó un par de planos inclinados tal como se muestra en la fig. 6.2.

En la fig. 6.2(a) una pelota se deja caer desde una altura h . La pelota desciende por el primer plano inclinado y asciende por el otro hasta una altura casi igual a la que tenía cuando se dejó caer. Galileo postuló que si no existiese la fuerza de fricción, la pelota alcanzaría exactamente la misma altura. Si, luego, el ángulo del segundo plano inclinado se reduce, fig. 6.2(b), y se aumenta la distancia a recorrer, la pelota alcanzaría nuevamente la misma altura h , si se desprecia la fricción.

El razonamiento de Galileo lo llevó a considerar qué sucedería si el segundo plano se acerca a un ángulo de 0° como se muestra en la fig. 6.3.

De acuerdo a la lógica de Galileo, la pelota, buscando alcanzar la altura inicial y en la ausencia de rozamiento, continuará moviéndose indefinidamente. Este experimento llevó al genial físico italiano a establecer que un objeto, si no existiese la fuerza de rozamiento, continuaría moviéndose permanentemente y, como en el caso de la fig. 6.3, no actúa fuerza horizontal alguna sobre la pelota, la teoría aristotélica estaba completamente equivocada.

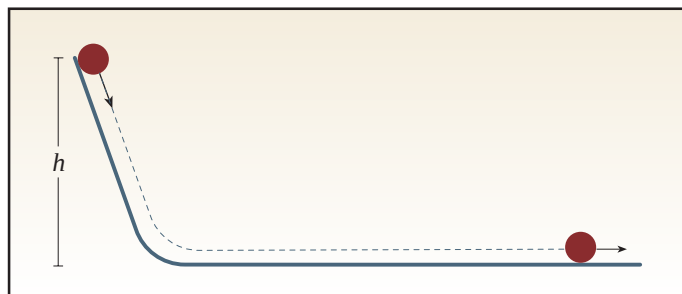


Fig. 6.3 De acuerdo con el razonamiento de Galileo, si no existiese fuerza de fricción, la pelota, lanzada desde una altura h , se movería indefinidamente, buscando alcanzar la altura inicial.

6.4 PRIMERA LEY DE NEWTON

“Si he visto más lejos que otros hombres es por que me he apoyado en hombros de gigantes”. Así se expresaba Isaac Newton para referirse al inmenso trabajo desarrollado por Galileo Galilei, Robert Hooke y Kepler, entre otros físicos notables. La primera ley de Newton se puede enunciar de la manera siguiente:

Un objeto en reposo tiende a permanecer en reposo y un objeto en movimiento tiende a permanecer en movimiento con la misma velocidad y en la misma dirección, a menos que sobre él actúe una fuerza no balanceada.

Un ejemplo dramático de la validez de la primera ley de Newton se ilustra en la fig. 6.4. El conductor de un automóvil se desplaza a una velocidad de 100 km/h sin llevar puesto el cinturón de seguridad. El carro choca contra un obstáculo fijo que lo detiene fig. 6.4(a). Al no llevar el cinturón de seguridad colocado, de acuerdo con la primera ley de Newton, el conductor continúa moviéndose (inercia) a 100 km/h. Esto significa que podría salir disparado a través del vidrio delantero a esa velocidad, fig. 6.4(b). Finalmente, fig. 6.4(c), el conductor se estrella contra el pavimento, siguiendo una trayectoria parabólica, debido a la fuerza de gravedad. De no existir esta fuerza y la de fricción, el conductor continuaría alejándose del vehículo indefinidamente, a una velocidad de 100 km/h.

A esta ley se le conoce como *ley de Inercia*. *Inercia es la tendencia que tiene un objeto a oponerse a cambiar en su estado de movimiento*. Los cambios en el estado de movimiento de un cuerpo pueden medirse por los cambios en su velocidad (magnitud y dirección), por lo cual la inercia puede, también, definirse de la manera siguiente:

La inercia es la tendencia que tiene un objeto a oponerse a cambios en su velocidad.

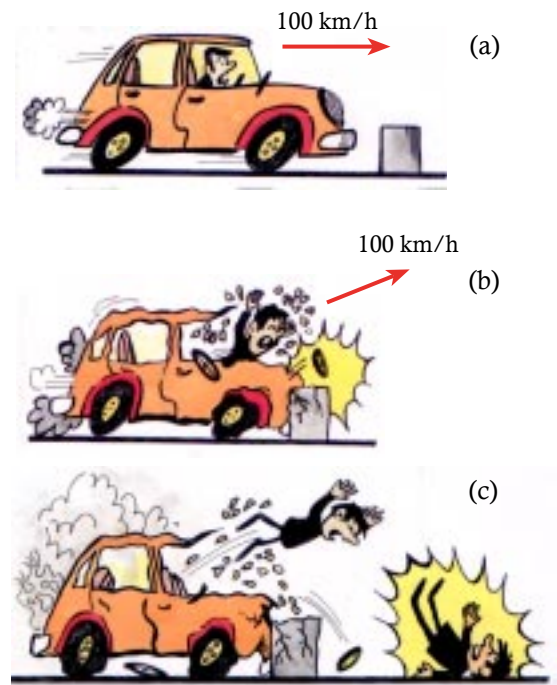


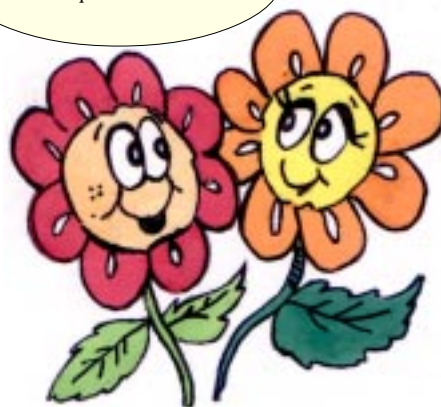
Fig. 6.4. De acuerdo a la primera ley de Newton, el conductor, sin el cinturón de seguridad, será arrojado del vehículo y se estrellará contra el pavimento. El cinturón de seguridad hubiera aportado la fuerza para evitar que el conductor se saliera del automóvil.

De acuerdo con lo anterior, un objeto en reposo permanecerá con velocidad igual a cero, ya que su tendencia es a permanecer en reposo. Un objeto en movimiento, desplazándose hacia el Norte con una velocidad constante de 5 m/s, permanecerá con esa velocidad si no hay fuerza que altere su estado de movimiento. En ambos casos, la aceleración es cero, lo que permite definir la inercia de la forma que sigue:

La inercia es la tendencia de un objeto a oponerse a ser acelerado.

En un lenguaje más coloquial podemos decir que la primera ley de Newton establece que “todo objeto trata de mantenerse haciendo lo que estaba haciendo”.

Todo objeto trata de seguir haciendo lo que estaba haciendo



Lo revolucionario de la primera ley de Newton es que destruye la afirmación milenaria, según la cual era necesaria una fuerza para mantener un objeto en movimiento. En realidad, se requiere de una fuerza para detener un cuerpo que se mueve (por ejemplo, la fuerza de rozamiento), pero no es necesaria la presencia de una fuerza para que dicho cuerpo continúe moviéndose: lo hace por inercia.

Ejemplos donde se pone de manifiesto la primera ley de Newton, son los siguientes:

- a. La cabeza de un martillo puede ser apretada en el mango de madera, golpeando el extremo del mismo contra una superficie rígida. Cuando el mango golpea la superficie rígida, la cabeza metálica trata de continuar moviéndose hacia abajo, apretándose en el mango.
- b. Cuando vamos bajando un ascensor y éste se detiene abruptamente, la sangre en la cabeza trata de irse hacia los pies, al seguir el movimiento del ascensor. Esto hace que se sienta cierta sensación desagradable cuando el ascensor frena.
- c. Cuando la salsa de tomate en un frasco está pegada al fondo del mismo, realizamos un movimiento brusco con el brazo para hacer que la salsa descienda al voltear el frasco. Esto se logra porque la salsa trata de seguir el movimiento del frasco.



Ejemplos de la vida diaria, donde se pone de manifiesto el principio de inercia.

6.5 FUERZAS BALANCEADAS Y NO BALANCEADAS

Cuando se enunció la primera ley de Newton, se estableció que un cuerpo en reposo tiende a permanecer en reposo o, si está en movimiento, trata de conservar su velocidad, a menos que sobre el mismo actúe una fuerza no balanceada.

Ahora bien, ¿qué es una fuerza balanceada? Con el fin de aclarar el concepto, consideremos un libro que descansa sobre la superficie superior de un escritorio, fig. 6.5. Sobre el mismo actúan dos fuerzas: la de gravedad de módulo F_g , que trata de empujar el libro hacia abajo y la fuerza normal de módulo F_n , correspondiente a la acción del escritorio sobre el libro, la cual tiene dirección hacia arriba. Esas dos fuerzas son iguales y opuestas, por lo que el libro se mantiene en equilibrio. Se dice, entonces, que las fuerzas están balanceadas. Como no hay fuerzas desbalanceadas, el libro se mantiene en su estado de movimiento, que corresponde, en este caso, al reposo. La aceleración es, por tanto, igual a cero. En muchas ocasiones, se utiliza el llamado *diagrama de cuerpo libre*, que consiste en aislar el objeto y mostrar las fuerzas actuantes sobre el mismo. Así, en la fig. 6.6 se muestra el diagrama de cuerpo libre del libro de la fig. 6.5.

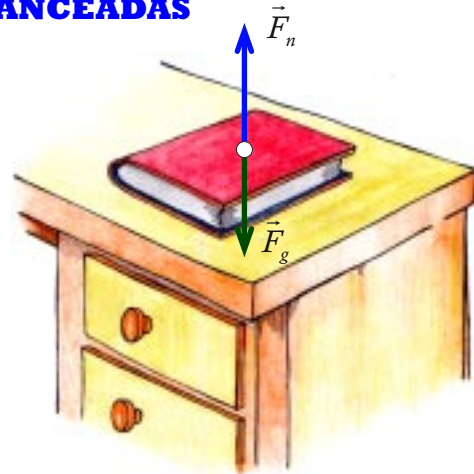


Fig. 6.5 El libro permanece en equilibrio por la presencia de fuerzas balanceadas.

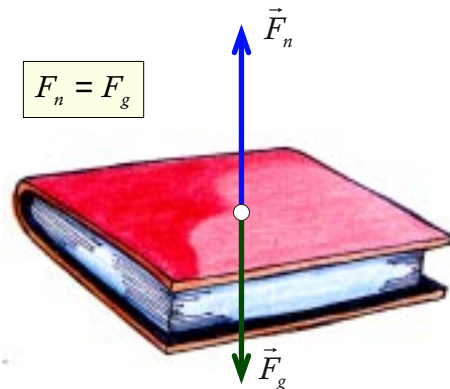


Fig. 6.6 Diagrama de cuerpo libre para el libro de la fig. 6.5.

Consideremos ahora una pelota que rueda sobre un plano, como se observa en la fig. 6.7(a). No hay fuerza alguna empujándola para que ruede. La fuerza normal ejercida por la superficie sobre la pelota contrarresta la fuerza de la gravedad. Esto impide que la pelota suba o baje. Sin embargo, la misma continúa moviéndose hacia la derecha, hasta detenerse. Esto, que en principio parece contradecir la primera ley de Newton, pues la pelota debería continuar en su estado de movimiento, sucede por la presencia de la fuerza de fricción, fuerza no balanceada, que se opone al movimiento de la pelota, ver fig. 6.7(b). Bajo la acción de la fuerza de fricción, $\vec{F}_\mu$, la pelota deja de estar en equilibrio, desacelera y, finalmente, cesa su movimiento.

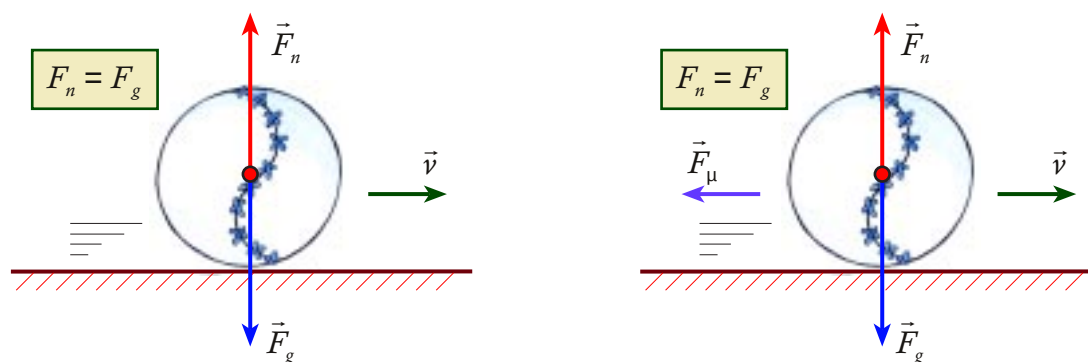


Fig. 6.7 a) En ausencia de fricción, la pelota rueda indefinidamente hacia la derecha con velocidad $\vec{v}$. La fuerza de gravedad es equilibrada por la fuerza normal. b) La fuerza $\vec{F}_\mu$ es una fuerza no balanceada que, luego de un tiempo, hace que la pelota se detenga.

6.6 INERCIA, MASA Y PESO

Ya establecimos que la inercia es la tendencia de un cuerpo a oponerse al cambio en su estado de reposo o de movimiento. Consideremos un balón de fútbol en reposo como se ilustra en la fig. 6.8(a). En este caso, el interior del balón está lleno de aire. Al ser golpeado, el mismo recorre la distancia x_1 . Si, posteriormente, el balón se llena de agua y, nuevamente es golpeado con la misma fuerza, la distancia recorrida x_2 es menor que la anterior. De esto se deduce que la oposición al cambio del estado de reposo en el segundo caso, es mayor que en el primero. Es decir, *la inercia del balón lleno de agua es mayor que la del balón lleno de aire*. Sin duda, lo que hace esa diferencia en la inercia es la materia con la cual está lleno el balón.

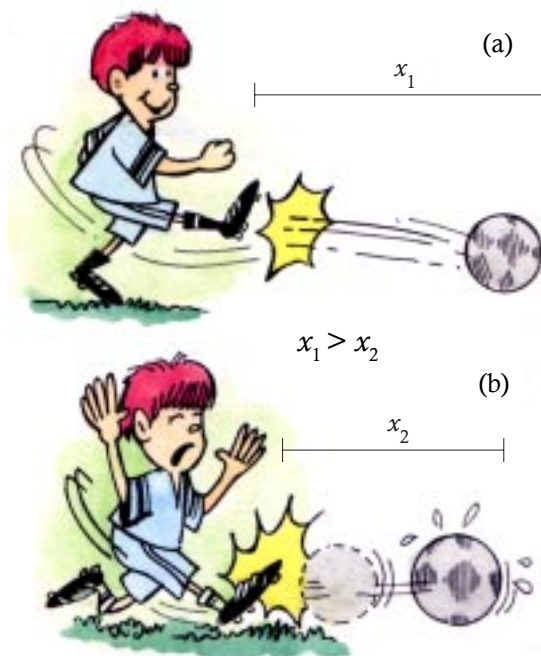


Fig. 6.8 Recorrido de un balón de fútbol al ser golpeado: a) Lleno de aire. b) Lleno de agua.

A la cantidad de materia que conforma un objeto se le denomina masa y ésta depende del tipo de átomos de la cual está constituido dicho objeto.

La masa puede considerarse, entonces, una medida de la inercia de un objeto: mientras más masa tenga el objeto, mayor será su inercia y mayor será la fuerza necesaria para cambiar su estado de movimiento.

La masa no debe confundirse con volumen. Los dos conceptos son completamente diferentes. El volumen mide el espacio ocupado por un cuerpo y, no necesariamente, aquél que tiene mayor volumen tiene mayor masa. Así, una vejiga de aire puede ocupar más espacio que un zapato fig. 6.9, pero este último tiene más inercia y por tanto, más masa que el primero. Por otro lado, los balones de la fig. 6.8 tienen igual volumen, pero masas completamente diferentes.



Fig. 6.9 La vejiga de aire tiene más volumen, pero menor masa que el zapato.

Con mucha frecuencia, *la masa es confundida con el peso*. Esta confusión tiene su origen en la costumbre de usar expresiones del tipo:

" ¿Cuántos kilos pesa Ud.? "

" Por favor, pésame 3 kilos de pescado "

Como la masa se expresa en kilogramos y se asocia con el verbo pesar, se establece un vínculo idiomático entre "masa" y "peso". En Física, estas dos expresiones constituyen conceptos diferentes. La masa, como ya establecimos, está íntimamente ligada a la cantidad de materia en un cuerpo y depende de los tipos de átomos que la constituyen. El peso, por otra parte, es una medida de la fuerza de gravedad que actúa sobre un objeto. El peso depende de la posición o de la localización del objeto.

La cantidad de materia de una persona en la Tierra es exactamente igual a la que tendría en la Luna o en otra parte del espacio exterior a la Tierra. Por tanto, su masa no varía con la posición o con la localización de la persona. Esto indica, así mismo, que la inercia permanece invariable, por lo que pudiese ser la misma la fuerza necesaria para variar el estado de reposo o de movimiento de la persona tanto en la Tierra como en otro lugar extraterrestre. Por otro lado, el peso de una persona, es decir, la fuerza con la cual la fuerza de gravedad actúa sobre ella, es completamente distinta si se encuentra en la Tie-



La masa no es igual al peso. Una persona en el espacio exterior, conserva su masa, pero su peso es nulo.

En la Luna pesaría $1/6$ de lo que pese en la Tierra, ya que la fuerza de gravedad en nuestro satélite natural es aproximadamente igual a $1/6$ del valor en la Tierra. En el espacio exterior, donde la fuerza de gravedad es nula, el peso de la persona será igual a cero.



PIENSA Y EXPLICA



- 6.1 Enuncia el concepto de fuerza.
- 6.2 ¿Qué son fuerzas de contacto y fuerzas de acción a distancia?
- 6.3 ¿Qué es una interacción?
- 6.4 Define fuerza de fricción y fuerza normal.
- 6.5 ¿Cuál es la unidad de fuerza y cómo se define?
- 6.6 ¿Qué decía Aristóteles en relación con el movimiento de un objeto y la fuerza aplicada al mismo? ¿Por qué esto es un error?
- 6.7 ¿Qué llevó a los seguidores de la teoría aristotélica a afirmar que la Tierra no se movía?
- 6.8 ¿Quién fue Copérnico? ¿Por qué lo afirmado por él fue tan controversial en su época?
- 6.9 ¿Quién fue Galileo y que contribuciones aportó a la Física?

- 6.10** Describe el experimento de Galileo que le permitió refutar las ideas de Aristóteles sobre el movimiento.
- 6.11** Enuncia la primera ley de Newton y di cómo contradice lo afirmado por la corriente aristotélica.
- 6.12** ¿Qué es la inercia? ¿Por qué a la primera ley de Newton también se le conoce como la ley de la inercia?
- 6.13** ¿Se aplica la ley de la inercia a objetos en movimiento o en reposo?
- 6.14** La primera ley de Newton establece que no se requiere fuerza alguna para mantener un cuerpo en movimiento. ¿Por qué, entonces, un ciclista tiene que pedalear permanentemente para continuar avanzando?
- 6.15** Si un astronauta lanza una roca en un sitio del cosmos donde no hay influencia de fuerzas gravitatorias o de roce, **a)** ¿Se detendrá la roca gradualmente? **b)** ¿Se seguirá moviendo con la misma velocidad y en la misma dirección?
- 6.16** Cuando un automóvil es chocado por detrás, se corre el riesgo de que sus pasajeros sufran daños en el cuello. ¿De qué forma se aplica la ley de Newton en este caso? ¿Cuál es el papel de los apoyacabezas y cómo pueden evitar esos daños?
- 6.17** ¿Por qué se siente una sensación extraña cuando un ascensor que sube, se detiene bruscamente en un piso de un edificio?
- 6.18** ¿Qué es una fuerza no balanceada? Da ejemplos de fuerzas balanceadas y no balanceadas.
- 6.19** ¿Qué es un diagrama de cuerpo libre?
- 6.20** Un coco se desprende de un cocotero. Dibuja el diagrama de cuerpo libre del coco, **a)** Sin tomar en cuenta la resistencia del aire. **b)** Tomando en cuenta la resistencia del aire.
- 6.21** ¿Cuál es el concepto de masa? ¿Cómo se relaciona con el de inercia?
- 6.22** ¿Qué mide el volumen de un cuerpo? ¿A mayor volumen hay más masa?
- 6.23** ¿Qué es el peso? ¿Cuál es la diferencia con la masa?

- 6.24** Un niño cuelga inmóvil en una barra de ejercicios. Haz un diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre el mismo. Ver fig. 6.10.
- 6.25** Un hombre empuja una caja sobre el suelo. Dibuja el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas sobre la caja, considerando la fricción. Ver fig. 6.11.



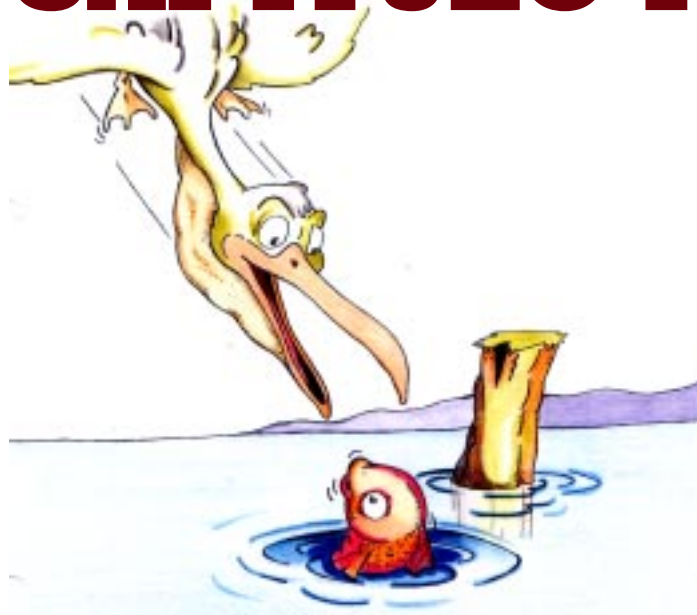
Fig. 6.10 Piensa y Explica 6.21.



Fig. 6.11 Piensa y Explica 6.22.

- 6.26** Para evitar ser alcanzado por un búfalo de gran tamaño un hombre se mueve en zig-zag. Explica por qué esta táctica puede darle resultado.
- 6.27** ¿Cómo se compara la masa de un objeto en la Tierra y en la Luna? ¿Cómo se comparan sus pesos?
- 6.28** ¿Cuál es el peso de un gandola en el espacio libre?
- 6.29** Un grupo grande de latas vacías de refrescos es compactado para ser transportado hasta la planta de reciclaje. ¿Cambió el volumen total? ¿La masa? ¿El peso? ¿La inercia?
- 6.30** ¿Por qué es más difícil detener a una gandola que a un automóvil, si alguno de ellos sufre una avería en los frenos?
- 6.31** Si se duplica la masa que contiene una caja de madera, ¿se duplica su inercia? ¿Se duplica su peso?
- 6.32** ¿Qué pesa más: 1 kg de clavos en la Luna o 1 kg de algodón en la Tierra?

CAPÍTULO 7



Segunda Ley de Newton

7.1 LA ACELERACIÓN DEPENDE DE LA FUERZA Y DE LA MASA

En el capítulo anterior estudiamos objetos que estaban en reposo o se movían a una velocidad constante. Bajo estas condiciones, dichos cuerpos, o estaban en equilibrio o no existían fuerzas desbalanceadas actuando sobre los mismos. Esto equivale a decir que la fuerza neta sobre el objeto es nula. Para reafirmar estos conceptos, consideremos la fig. 7.1, donde un libro reposa, fig. 7.1(a), o se mueve con velocidad constante, figs. 7.1(b) y (c), sobre una superficie. En esa figura se presenta el diagrama de cuerpo libre. Todas las fuerzas actuantes sobre el libro son tomadas en cuenta.

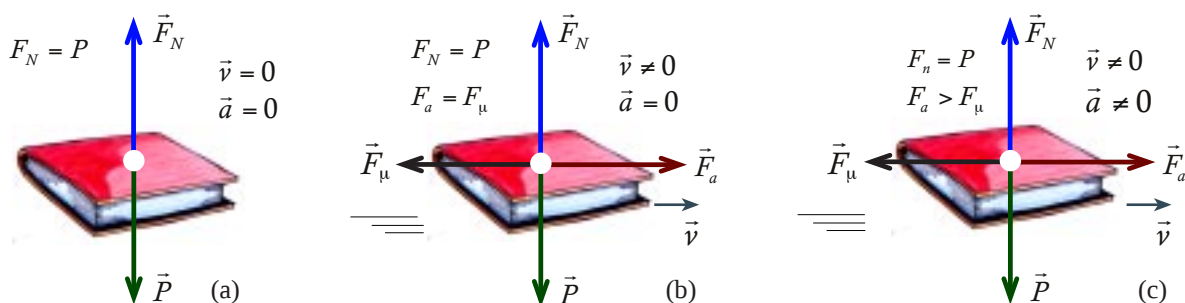


Fig. 7.1 En (a) y (b) el libro está en equilibrio y la fuerza neta es igual a cero. En (c) las fuerzas horizontales están desbalanceadas y la fuerza neta no es igual a cero.

En la fig. 7.1(a) el libro está en reposo. Las fuerzas verticales corresponden al peso $\vec{P}$ del libro (fuerza gravitacional), dirigido hacia abajo, y la fuerza normal $\vec{F}_N$, que ejerce la superficie sobre el libro y dirigida hacia arriba. Las dos fuerzas verticales tienen la misma magnitud, pero direcciones opuestas. El libro está, por lo tanto, en equilibrio, por no existir fuerzas desbalanceadas. Es decir, la fuerza neta es cero, ya que:

$$F_{\text{neta}} = F_N - P = 0 \quad \Rightarrow \quad F_N = P$$

Como consecuencia, la velocidad y la aceleración son nulas. Consideremos ahora la fig. 7.1(b). En este caso, se aplica al libro una fuerza horizontal hacia la derecha, $\vec{F}_a$, de magnitud tal que balancea a la fuerza del roce $\vec{F}_\mu$, dirigida hacia la izquierda. Las fuerzas verticales nuevamente se cancelan ($F_N = P$). Aun cuando la fuerza aplicada, F_a , es balanceada por la fuerza de rozamiento, F_μ , el libro se mueve. Sin embargo, lo hace a velocidad constante, pues no hay fuerzas desbalanceadas. Nuevamente, la fuerza neta, tanto en el eje vertical como en el horizontal, es igual a cero. Es decir:

$$F_{\text{neta}}(\text{Vertical}) = F_N - P = 0 \quad \Rightarrow \quad F_N = P$$

$$F_{\text{neta}}(\text{Horizontal}) = F_a - F_\mu = 0 \quad \Rightarrow \quad F_a = F_\mu$$

Como resultado, el libro se mueve horizontalmente hacia la derecha con velocidad constante. Es decir, con aceleración igual a cero.

Observa, entonces, que en los dos casos anteriormente discutidos, se cumple la primera ley de Newton: cuando la fuerza neta sobre el libro es nula, está en reposo o se mueve con velocidad constante ($a = 0$).



Cuando la fuerza neta sobre un objeto es nula, éste está en reposo o se mueve con velocidad constante.

Supongamos, ahora, que se aplica al libro una fuerza horizontal $\vec{F}_a$, hacia la derecha, tal como se muestra en la fig. 7.1(c). Si F_a supera al módulo de la fuerza de rozamiento, F_μ , el libro se moverá hacia la derecha. Ahora bien, en este caso no hay equilibrio de fuerzas en la dirección horizontal debido a la presencia de fuerzas no balanceadas. En otras palabras, la fuerza neta en la dirección horizontal no es nula. Como consecuencia, la velocidad no permanece constante y el libro acelera. Podemos concluir, entonces, que *una fuerza neta distinta de cero produce aceleración*.

¿Qué tan grande es la aceleración producida por una fuerza neta no nula? El módulo de la fuerza neta en la fig. 7.1(c) está por dado por:

$$F_{neta} = F_a - F_{\mu} \quad (F_a > F_{\mu})$$

En general, a medida que la fuerza neta sobre un objeto de masa constante aumenta, también aumenta la aceleración. Si se duplica la fuerza neta, se duplica la aceleración. Si se triplica la fuerza, se triplica la aceleración y así sucesivamente. Esto se expresa diciendo que *la aceleración es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre un objeto*. En lenguaje matemático:

La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre el mismo.



$$\text{aceleración} \sim F_{neta} \quad \Rightarrow \quad a \sim F_{neta} \quad (7.1)$$

Donde el símbolo $\sim$ significa “directamente proporcional”.

Por otro lado, la aceleración depende de la masa de un objeto. La aceleración resultante al aplicar la misma fuerza a una carretilla vacía es mayor que si ésta estuviera cargada.

Lo anterior podemos resumirlo diciendo que *a menor masa mayor aceleración y que a mayor masa menor aceleración, para una misma fuerza*. En lenguaje matemático se dice que *la aceleración es inversamente proporcional a la masa*, expresión que se denota de la forma siguiente:

$$\text{aceleración} \sim \frac{1}{m} \quad \Rightarrow \quad a \sim \frac{1}{m} \quad (7.2)$$

lo cual indica que a medida que el denominador, m , aumenta, la aceleración, a , disminuye y viceversa.

En la fig. 7.2 se contrastan los resultados en los casos de fuerzas balanceadas y no balanceadas. En el primer caso, no hay aceleración, mientras que en el segundo resulta una aceleración directamente proporcional a la fuerza neta e inversamente proporcional a la masa.

7.2 SEGUNDA LEY DE NEWTON

La primera ley de Newton explica el comportamiento dinámico de los objetos sobre los cuales la fuerza neta es nula. Bajo esta condición, las fuerzas aplicadas están balanceadas y la aceleración es igual a cero. Por el contrario, la presencia de fuerzas no balanceadas producirá una aceleración, lo que implica el cambio de velocidad de un objeto, bien sea

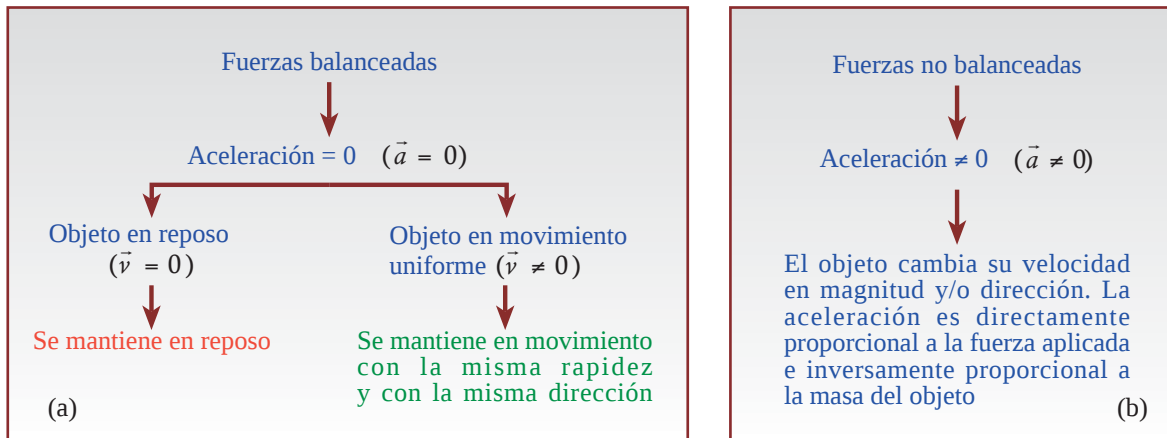


Fig. 7.2 Aceleración resultante sobre un objeto: a) Cuando la fuerza neta es igual a cero. b) Cuando la fuerza neta no es igual a cero.

por variaciones de su magnitud, su dirección o ambas simultáneamente. Newton fue el primero en percatarse que la aceleración de un objeto depende tanto de la fuerza neta resultante como de la masa del mismo. Esta observación devino en una de las más importantes leyes de la naturaleza, la segunda ley de Newton, que establece lo siguiente:

La aceleración producida por una fuerza neta sobre un objeto es directamente proporcional a la magnitud de dicha fuerza, en su misma dirección, e inversamente proporcional a la masa del objeto.

La expresión matemática de la segunda ley de Newton es:

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{Fuerza Neta}}{\text{Masa}} \Rightarrow \boxed{a = \frac{F}{m}} \quad (7.3)$$

Como la fuerza es una cantidad vectorial, la aceleración también es un vector y tiene la misma dirección de la fuerza. Entonces, la relación (7.3) puede escribirse como:

$$\boxed{\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}} \quad (7.4)$$

Si despejamos F de (7.3), obtenemos:

$$\boxed{F = m \cdot a} \quad (7.5)$$

que es la forma más usual para expresar la segunda ley de Newton.

Como vimos en el capítulo anterior, la unidad fundamental de fuerza es el newton (N), que es la fuerza a aplicar a un objeto de masa igual a 1 kg para obtener una aceleración de 1 m/s^2 . Si sustituimos esas cantidades en (7.5):

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \Rightarrow \quad 1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} \quad (7.6)$$

Ejemplo 7.1

Una persona hala un pequeño vagón cargado, a lo largo de unos rieles a partir del reposo. Si la masa del vagón y su carga es de 200 kg, la fricción puede despreciarse y la fuerza ejercida por la persona es de 120 N determina: **a)** La aceleración del vagón. **b)** La distancia recorrida para $t = 20 \text{ s}$. En la fig. 7.3 (a) se ilustra la situación planteada.



Fig. 7.3 a) El vagón se desliza en virtud de la fuerza aplicada, $\vec{F}_a$. **b)** Diagrama de cuerpo libre para el vagón.

Solución

a) En la fig. 7.3(b) se muestra el diagrama de cuerpo libre donde aparecen las fuerzas que actúan sobre el vagón. Las fuerzas verticales se cancelan, ya que el peso, P , es balanceado por la fuerza normal, F_N . Observa que ambas fuerzas son cantidades vectoriales en el eje Y, y pueden escribirse como:

$$\vec{F}_N = F_N \vec{j} \quad \vec{P} = P(-\vec{j}) = -P\vec{j}$$

La fuerza neta en el eje vertical es igual a la suma vectorial de $\vec{F}_N$ y $\vec{P}$:

$$\vec{F}_{\text{Neta}} = \vec{F}_N + \vec{P} = F_N \vec{j} + (-P\vec{j}) = F_N \vec{j} - P\vec{j} = (F_N - P)\vec{j}$$

Como $F_N = P$:

$$\vec{F}_{Neta} = 0$$

Si se ignora la fuerza de fricción, la fuerza aplicada $\vec{F}_a$, es una fuerza horizontal no balanceada y, por lo tanto, de acuerdo a la segunda ley de Newton, se producirá una aceleración hacia la derecha. En este caso, se tiene:

$$\vec{F}_{Neta} = \vec{F}_a = F_a \vec{i}$$

Como la fuerza aplicada es de 120 N:

$$\vec{F}_{Neta} = 120\vec{i} \text{ N}$$

Según la relación (7.3):

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{Neta}}{m} = \frac{120\vec{i} \text{ N}}{200 \text{ kg}} = 0,6\vec{i} \frac{\text{kgm/s}^2}{\text{kg}} = 0,6\vec{i} \text{ m/s}^2$$

Es decir, la magnitud de la aceleración es $a = 0,6 \text{ m/s}^2$ y su dirección es la misma ($\vec{i}$) de la fuerza aplicada.

b) La distancia horizontal recorrida se puede obtener a partir de la relación:

$$x = v_o t + \frac{1}{2} a t^2$$

Como el vagón parte del reposo, $v_o = 0$. Cuando $t = 20 \text{ s}$, tendremos:

$$x = \frac{1}{2} a t^2 \quad \Rightarrow \quad x = \frac{1}{2} \cdot 0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 400 \text{ s}^2 = 120 \text{ m}$$

Si una fuerza neta produce una aceleración de 1 m/s^2 sobre una masa de 1 kg , su valor es de 1 newton .



7.3 EL PESO DE UN CUERPO Y LA SEGUNDA LEY DE NEWTON

En capítulo anterior, definimos el peso de un cuerpo en la Tierra como la fuerza con la cual la misma lo atrae. La segunda ley de Newton se expresa matemáticamente como:

$$F_{Neta} = ma$$

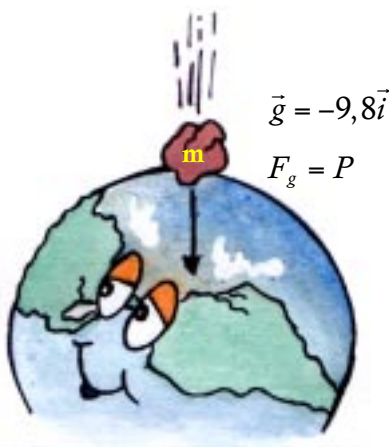


Fig. 7.4 Un cuerpo que cae libremente, lo hace bajo la influencia de la fuerza de atracción de la Tierra.

Cuando un cuerpo de masa m cae hacia la superficie terrestre, fig. 7.4, la única fuerza que actúa sobre él, si despreciamos la resistencia del aire, es la fuerza de atracción de la Tierra, $\vec{F}_g$. Dicha fuerza está dirigida hacia el centro de nuestro planeta. En este caso, se tiene:

$$\vec{F}_{\text{Neta}} = \vec{F}_g$$

Como la fuerza gravitacional, $\vec{F}_g$, corresponde al peso, $\vec{P}$, del cuerpo, de acuerdo con la segunda ley de Newton, se puede escribir:

$$\vec{F}_{\text{Neta}} = \vec{F}_g = \vec{P} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{P} = m\vec{a}$$

Puesto que la aceleración con la cual cae un cuerpo corresponde a la de la gravedad, la relación anterior puede escribirse en forma escalar como:

$$P = mg \quad (7.7)$$

La segunda ley de Newton permite explicar por qué cuerpos con distintos pesos caen simultáneamente desde una misma altura y . Aun cuando el peso es directamente proporcional a la masa (por ejemplo, si la masa se duplica o triplica, el peso también se duplica o triplica), la aceleración permanece constante e igual a g :

$$\text{Aceleración} = g = \frac{F_{\text{Neta}}}{\text{Masa}} = \frac{\text{Peso}}{\text{Masa}} \Rightarrow g = \frac{P}{m}$$

Si la masa se duplica, el peso se duplica: $a = \frac{2P}{2m} = \frac{P}{m} = g$

Si la masa se triplica, el peso se triplica: $a = \frac{3P}{3m} = \frac{P}{m} = g$

El desplazamiento y el tiempo en caída libre están dados por las expresiones:

$$y = \frac{1}{2}gt^2 \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$$

Como g es una constante y los cuerpos se dejan caer desde igual altura, el tiempo de

caída es independiente de las masas de los mismos:

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}} = \text{constante} \quad (7.8)$$

Ejemplo 7.2

Determina la fuerza gravitacional sobre una naranja de masa 100 g. ¿Cuál es su peso?

Solución

La fuerza gravitacional es la fuerza con la cual la Tierra atrae a un cuerpo:

$$F_g = ma$$

Como la aceleración corresponde a la gravedad ($a = g$) y $m = 0,1$ kg:

$$F_g = mg = 0,1 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 = 0,98 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \Rightarrow F_g \approx 1 \text{ N}$$

Entonces, una masa de 100 g da lugar a una fuerza gravitacional aproximadamente igual a 1 N. El peso tiene la misma magnitud de la fuerza gravitacional. Es decir:

$$P = mg = 1 \text{ N}$$

Ejemplo 7.3

Una planta ornamental se cuelga mediante una cuerda de nylon al techo de una sala de estar, como se muestra en la fig. 7.5(a). La cuerda es capaz de soportar una fuerza de 100 N. ¿Resistirá la cuerda? Considera que la planta tiene una masa de a) 8 kg, b) 12 kg.

Solución

Sobre el envase de la planta actúan la fuerza gravitacional $\vec{P}$ y la tensión de la cuerda $\vec{T}$, esta última distribuida entre los 3 alambres atados a la arazón del envase. En la fig. 7.5(b) se muestra el diagrama de cuerpo libre. La cuerda resistirá el peso $\vec{P}$ si $T > P$.

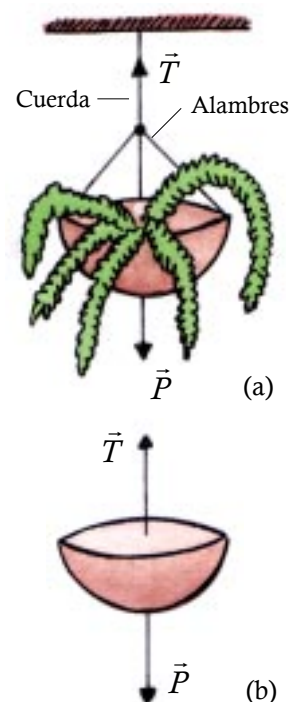


Fig. 7.5 Ejemplo 7.3.

a) Si $m = 8$ kg:

$$P = mg = 8 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 = 78,4 \text{ N}$$

Y la cuerda de nylon soportará el peso de la planta, ya que $P < T$.

b) Si $m = 12$ kg:

$$P = mg = 12 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 = 117,6 \text{ N}$$

Como el último valor supera 100 N, la cuerda no resistirá el peso de la planta.

7.4 LA FUERZA DE FRICCIÓN

La *fuerza de fricción* o, simplemente, *fricción*, es la resistencia al movimiento de un cuerpo en relación con otro con el cual se está en contacto. Entonces, podemos afirmar que *la fricción es una fuerza que se opone al movimiento de un cuerpo*.

La fricción está presente en la interacción entre todos los medios: sólidos, líquidos y gaseosos, y la magnitud de la misma depende de la naturaleza de las superficies en contacto. Si dichas superficies están pulidas, la fricción es menor que en el caso de superficies rugosas.

Muchos esfuerzos e investigaciones han sido orientados a tratar de disminuir la fuerza de fricción, pues su presencia causa desgaste considerable en maquinarias y equipos. Los aceites lubricantes utilizados en un automóvil, por ejemplo, disminuyen el rozamiento entre las partes móviles de los mismos reduciendo así el consumo de energía. Sin embargo no siempre la fricción tiene efectos adversos. En particular, no sería posible caminar si no fuera por la presencia de la fricción. Todos hemos experimentado lo difícil que resulta caminar sobre una superficie pulida. En este caso de poca fricción, la persona resbala sin poder avanzar efectivamente,



Gracias a la fuerza de fricción, es más fácil caminar sobre una superficie rugosa que sobre una superficie lisa.

¿Has tratado alguna vez de mover un vehículo detenido? Cuando comienzas a empujar es difícil hacer que el carro se mueva, pero una vez que esto se logra, es más fácil mantenerlo en movimiento. Esto es ilustrativo de lo que se conoce en el primer caso, como *fricción estática* o, en el segundo caso, como *fricción cinética o dinámica*. La primera tiene que ver con la fuerza de fricción que impide que un cuerpo comience a moverse, mientras que la segunda surge cuando el objeto se mueve, oponiéndose al movimiento del mismo. En ambos casos, se ha demostrado experimentalmente que la *fuerza de fricción depende de la naturaleza de las superficies en contacto y es proporcional a la fuerza normal*.

En la fig. 7.6, una persona trata de mover hacia la derecha una nevera de masa m . A pesar de la fuerza horizontal $\vec{F}_a$, aplicada por la persona al principio, la nevera no se mueve. Esto es así porque existe una fuerza de sentido contrario a $\vec{F}_a$ que tiene la misma magnitud que ésta. Para tratar de lograr su propósito, la persona empuja con más y más fuerza hasta que ¡al fin! la nevera comienza a moverse, fig. 7.7. La fuerza que impide el movimiento es, precisamente, la fuerza de fricción estática, cuya magnitud es siempre exactamente igual a la fuerza aplicada y cuya dirección es contraria a la de ésta. Antes de moverse, la fuerza neta sobre la nevera es nula y, por lo tanto, no hay aceleración.

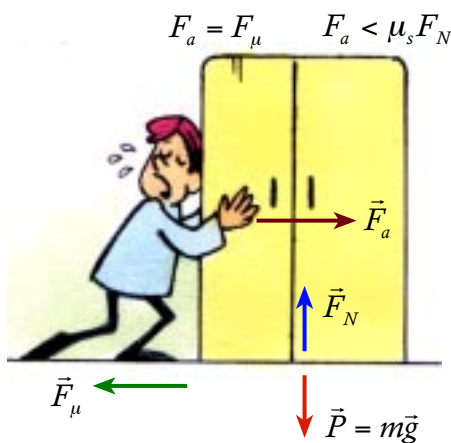


Fig. 7.6 La fuerza de fricción, $\vec{F}_\mu$, impide que para ciertos valores de $\vec{F}_a$, la nevera se mueva.

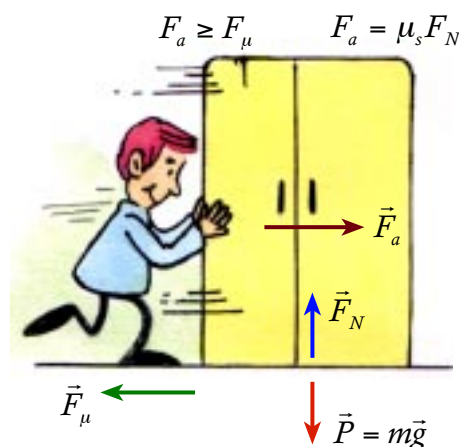


Fig. 7.7 A medida que aumenta la fuerza aplicada a la nevera, se alcanza un valor que permite que la misma comience a moverse.

Cuando la nevera comienza a moverse, la fuerza aplicada, F_a , equilibra a la fuerza estática de rozamiento, F_{μ_s} , y, por lo tanto, sus módulos son iguales:

$$F_a = F_{\mu_s} \quad (\text{El objeto comienza a moverse}) \quad (7.9)$$

La fuerza estática de rozamiento es proporcional al peso (o a la fuerza normal), por lo que podemos escribir:

$$F_{\mu_s} = \mu_s N \quad \Rightarrow \quad F_a = \mu_s N = \mu_s mg \quad (\text{El objeto comienza a moverse}) \quad (7.10)$$

Donde μ_s es el coeficiente estático de fricción.

Antes de que la nevera comience a moverse, la fuerza aplicada, cuyo valor es igual al de la fuerza estática de roce, es menor que el valor anterior:

$$F_a < \mu_s N \quad \Rightarrow \quad F_{\mu_s} < \mu_s N \quad (\text{Antes que el objeto se mueva}) \quad (7.11)$$

Una vez que la nevera comienza a moverse, el desplazamiento de la misma se facilita, pues la fuerza de fricción disminuye. En este caso, podemos escribir:

$$F_{\mu_d} = \mu_d N \quad (\text{El objeto se mueve}) \quad (7.12)$$

Donde F_{μ_d} es la fuerza dinámica de fricción y μ_d es el coeficiente dinámico de fricción. Para que la nevera acelere, es necesario que la fuerza aplicada supere a la de fricción.

Materiales	μ_s	μ_d
Madera-Madera	0,58	0,40
Aluminio-Acero	0,61	0,47
Vidrio-Vidrio	0,94	0,35
Caucho-Concreto	1,20	0,85

Tabla 7.1 Coeficientes estático y dinámico de fricción para algunos materiales.

En la tabla 7.1 se muestran los coeficientes estáticos y dinámicos de fricción de algunos materiales. Estos coeficientes son determinados experimentalmente para diversos materiales en contacto. En general, los coeficientes dinámicos de fricción tienen valores más pequeños que los coeficientes estáticos, lo cual indica que, para una misma masa, la fuerza dinámica de fricción es menor que la fuerza estática de fricción.

Ejemplo 7.4

Una persona empuja la caja de madera de la fig. 7.8. La caja tiene una masa de 80 kg y el piso también es de madera. **a)** ¿Cuál es la fuerza horizontal que debe ejercer la persona para mover la caja? **b)** Suponiendo que se mantiene la fuerza con la cual la persona empuja la caja, ¿qué aceleración alcanza ésta? **c)** ¿Cuál es la velocidad de la caja y la distancia recorrida en 3 s?

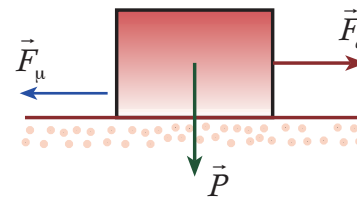


Fig. 7.8 Ejemplo 7.4.

Solución

a) Para que la caja comience a moverse, se debe cumplir:

$$F_a = F_{\mu_s} \quad \Rightarrow \quad F_a = \mu_s N$$

Como $N = P$ y $P = mg$, la relación anterior puede escribirse:

$$F_a = \mu_s mg$$

De la tabla 7.1, $\mu_s = 0,58$. Luego:

$$F_a = 0,58 \cdot 80 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 = 454,72 \text{ N}$$

b) De acuerdo con la segunda ley de Newton y observando la fig. 7.8, tenemos:

$$F_a - F_{\mu_d} = ma$$

Despejando la aceleración:

$$a = \frac{F_a - F_{\mu_d}}{m}$$

Como el cuerpo está en movimiento, para calcular la fuerza de roce utilizamos el coeficiente dinámico de rozamiento. De la tabla 7.1, $\mu_d = 0,40$. Luego:

$$F_{\mu_d} = 0,40 \cdot 80 \cdot 9,8 \text{ kgm/s}^2 = 313,6 \text{ N}$$

Sustituyendo en la expresión para la aceleración:

$$a = \frac{(454,72 - 313,60) \text{ N}}{80 \text{ kg}} = \frac{141,12}{80} \text{ m/s}^2 = 1,76 \text{ m/s}^2$$

c) La velocidad de la caja es:

$$v = at = 1,76 \text{ m/s}^2 \cdot 3 \text{ s} = 5,28 \text{ m/s}$$

La distancia recorrida puede calcularse de la forma siguiente:

$$x = \frac{1}{2} at^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,76 \text{ m/s}^2 \cdot 9 \text{ s}^2 = 7,92 \text{ m}$$



PIENSA Y EXPLICA



- 7.1 ¿Qué es fuerza neta? Da ejemplos.
- 7.2 Define fuerza normal. Da un ejemplo gráfico.
- 7.3 ¿Qué relación hay entre fuerza neta y aceleración?
- 7.4 ¿Qué relación hay entre masa y aceleración?
- 7.5 Si un cuerpo no tiene aceleración, ¿se puede decir que no hay y fuerzas actuando sobre el mismo?
- 7.6 Expresa matemáticamente la segunda ley de Newton y describe su significado físico.
- 7.7 Si una agenda electrónica tiene una masa de 100 gramos, ¿cuál es su peso en newtons?
- 7.8 ¿Cómo explica la segunda ley de Newton el hecho de que objetos con masas distintas tardan lo mismo en caer desde una altura h ?
- 7.9 ¿Cuáles fuerzas afectan la caída de un objeto?
- 7.10 ¿Qué es la fuerza de fricción y qué la origina?
- 7.11 ¿Cuál es la diferencia entre fricción estática y fricción dinámica?
- 7.12 ¿Qué efectos positivos y negativos tiene la fricción?
- 7.13 ¿Qué relación tiene la fuerza de fricción con el peso de un cuerpo?
- 7.14 ¿Por qué es más fácil el deslizamiento de un cuerpo en movimiento que el de uno en reposo?

- 7.15** Si se empuja un objeto con una fuerza de 20 N y éste no se mueve, ¿cuál es el valor de la fuerza de fricción?
- 7.16** ¿Qué dirección tiene la fuerza de fricción en relación con la fuerza aplicada?
- 7.17** ¿Por qué la fuerza de fricción permite que una persona avance al caminar?
- 7.18** ¿Por qué un cuchillo afilado corta mejor que uno romo?

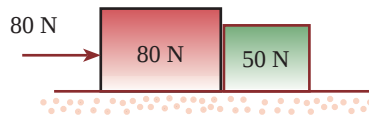
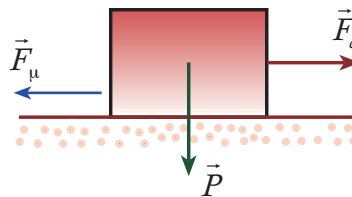


PROBLEMAS



- 7.1** Un bloque de 2,5 kg es empujado por una fuerza horizontal de 25 N sobre una superficie sin rozamiento. **a)** ¿Cuál es la aceleración del bloque? **b)** Si la fuerza de fricción es 5 N, ¿cuál es la aceleración del bloque? **c)** En los dos casos anteriores, ¿cuál es la velocidad del bloque cuando ha recorrido 2 m?
- 7.2** ¿Qué fuerza horizontal debe aplicarse a una masa de 2 kg para producir una aceleración de $9,8 \text{ m/s}^2$? Considera que no hay fricción.
- 7.3** Para mantener un libro moviéndose a velocidad constante sobre una superficie lisa, se requiere una fuerza de 10 N **a)** ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre el libro? **b)** ¿Cuál es la magnitud de la fuerza de fricción que actúa sobre el libro?
- 7.4** Una caja llena de materiales eléctricos de 50 kg de masa descansa sobre un piso horizontal. El coeficiente cinético de fricción entre el piso y la caja es 0,30. Una fuerza horizontal de 200 N se aplica a la caja por 4 s. ¿Cuál es la velocidad de la caja después de los 4 s?
- 7.5** Un trabajador hala una carretilla aplicando una fuerza de 120 N. Si la carretilla alcanza una aceleración de $0,8 \text{ m/s}^2$, determina su peso.
- 7.6** Un bloque de hierro de 20 kg desliza sobre una superficie bajo la acción de una fuerza de 250 N. El coeficiente dinámico de rozamiento es igual a 0,5 ¿Cuál es la aceleración del bloque?

- 7.7** Un vehículo de masa igual a 1.200 kg se mueve a una velocidad constante de 80 km/h. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre el mismo?
- 7.8** Dos bloques de hielo descansan sobre una superficie lisa como se muestra en la fig. 7.9. Si se aplica una fuerza de 80 N al bloque más pesado, determina la distancia recorrida por los bloques en 10 segundos, si el más grande pesa 80 N y el más pequeño pesa 50 N. El rozamiento es despreciable.
- 7.9** Una caja metálica de 20 kg descansa sobre una superficie plana, como se muestra en la fig. 7.10. Si el coeficiente estático de fricción es 0,8 y se aplica una fuerza horizontal de: **a)** 50 N, **b)** 100 N, ¿cuánto vale la fuerza de rozamiento? **c)** ¿Cuál es la fuerza mínima que se debe aplicar para que el bloque se mueva?
- 7.10** Un automóvil de masa 1.000 kg parte del reposo y luego de 8 s la magnitud de su velocidad es de 20 m/s. Si la aceleración permanece constante durante el recorrido, ¿cuál es la magnitud de la fuerza neta sobre el automóvil?

**Fig. 7.9 Problema 7.8.****Fig. 7.10 Problema 7.9.**

CAPÍTULO 8



Tercera Ley de Newton Ley de la Gravitación Universal

8.1 INTERACCIONES. FUERZAS DE ACCIÓN Y REACCIÓN.

En capítulos anteriores se definió la fuerza como un empujón o un jalón que se ejercía sobre un determinado objeto. Newton se dio cuenta que, cuando esto se producía, se originaba un vínculo entre los factores que intervenían en el fenómeno. El resultado obtenido, muchas veces oscurecía la interpretación del mismo. Así, cuando alguien golpea una pelota, fig. 8.1, lo usual es que se piense que la persona ejerce una fuerza sobre la pelota y, como resultado, esta última se mueve. Sin embargo, es difícil pensar que la pelota ejerció acción alguna sobre la persona.



Fig. 8.1. La persona golpea la pelota y ésta se mueve. A simple vista, la pelota parece no afectar el estado de movimiento de la persona.



Fig. 8.2 La misma persona de la fig. 8.1 lanza la pelota montado, ahora, sobre una patineta.

Para poner en evidencia que existe una relación recíproca entre dos objetos que intervienen en la aparición de fuerzas en un determinado fenómeno físico, consideremos la fig. 8.2. La misma persona de la fig. 8.1, montada sobre una patineta, golpea la pelota hacia la derecha. Como consecuencia de esto, la patineta se desliza hacia la izquierda. ¿De dónde salió la fuerza que originó este último movimiento? Según lo establecido por Newton, existe una interacción entre los objetos que participan en la experiencia: la pelota y el hombre montado en la patineta. Esa interacción determina tanto el movimiento hacia la derecha de la pelota como el movimiento hacia la izquierda de la persona. Esto significa que de la misma forma que la persona ejerce una fuerza sobre la pelota, esta última también ejerce una fuerza sobre la persona. Ahora bien, ¿por qué en el caso de la fig. 8.1 la persona no se mueve hacia la izquierda mientras que en la fig. 8.2 sí se mueve? La fuerza de fricción es la responsable de la diferencia. Cuando la persona está sobre la patineta, las ruedas de la misma disminuyen la fuerza de rozamiento que se opone al movimiento.

Newton se percató de la aparición de este par de fuerzas de igual magnitud y sentido contrario. A una de estas fuerzas cualquiera de ellas, se le denomina *acción*, mientras que a la otra se le llama *reacción*. Ambas fuerzas se presentan siempre en pares y constituyen la base sobre la cual se asientan muchos de los avances en la carrera espacial.

En la fig. 8.3 se muestra un ejemplo sencillo de cómo actúan las fuerzas de acción y reacción. El aire expelido por el globo sale con una fuerza $\vec{F}$. A la vez, el aire expulsado ejerce sobre el carrito una fuerza de igual magnitud y dirección contraria, que lo hace avanzar.

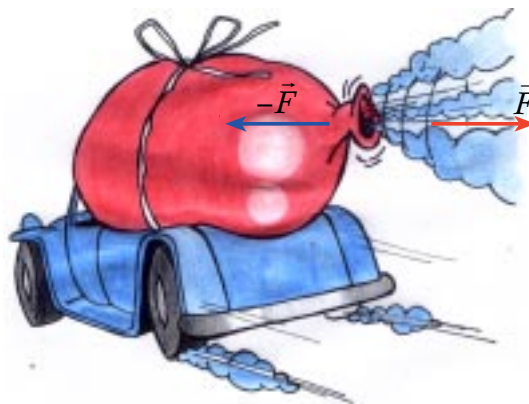


Fig. 8.3 Ejemplo de la presencia de las fuerzas de acción y reacción.

Existen situaciones donde no hay desplazamiento (o movimiento notable) que parecen excluir la presencia de fuerzas de acción y reacción. Por ejemplo, en la fig. 8.4 el hombre hace una fuerza al empujar con su mano la pared. A pesar de que no hay desplazamiento apreciable de la pared o del hombre, la pared ejerce una fuerza de la misma magnitud y sentido contrario sobre este último. Si esto no fuera así, este último atravesaría la pared, rompiendo el equilibrio del sistema.



Fig. 8.4 El hombre empuja a la pared y la pared empuja al hombre.

8.2 TERCERA LEY DE NEWTON

La presencia de una gran variedad de fuerzas de acción y reacción en la naturaleza fue observada por Newton, quien expresó el fenómeno en su famosa tercera ley:

Si un objeto ejerce una fuerza sobre otro objeto, este último ejerce una fuerza igual y de dirección opuesta sobre el primero.

En términos de las fuerzas de acción y reacción, la tercera ley de Newton puede enunciarse de la siguiente manera:

A cada acción corresponde una reacción de igual magnitud y dirección contraria.

Las dos expresiones anteriores significan que, cuando tiene lugar una interacción entre dos objetos, hay un par de fuerzas actuando sobre los mismos. La magnitud de la fuerza sobre el primer objeto es igual a la magnitud de la fuerza sobre el segundo objeto. La dirección de la fuerza sobre el primer objeto es opuesta a la dirección de la fuerza sobre el segundo objeto.

Las fuerzas de acción y reacción, núcleo básico de la tercera ley de Newton, son responsables de muchos fenómenos físicos naturales. A continuación, citamos ejemplos que ponen de manifiesto la presencia de la tercera ley de Newton.

Ejemplo 8.1

Un clavo es golpeado por un martillo

Solución

Cuando un martillo golpea a un clavo, fig. 8.5, el primero ejerce una fuerza de magnitud F dirigida hacia abajo, que hace que el clavo se introduzca en el bloque de madera. A F la llamamos fuerza de acción. De acuerdo a la tercera ley de Newton, el clavo ejerce sobre el martillo una fuerza de la misma magnitud y sentido contrario. A esta fuerza la denominamos reacción. Es importante hacer notar que hemos podido llamar a F fuerza de reacción y a $-F$ fuerza de acción, sin que conce ptualmente se modifique nada.

También es necesario visualizar que *las fuerzas de acción y reacción se aplican a objetos diferentes*: en este ejemplo, la acción se aplica sobre el clavo, mientras que la reacción se aplica al martillo. Esto hay que recalcarlo porque, a menudo, se piensa erróneamente que como las fuerzas de acción y reacción son iguales y de dirección contraria, los objetos envueltos en la interacción no deben moverse. En el ejemplo del martillo que golpea al clavo, se producen entonces fuerzas sobre los dos objetos. La fuerza de acción sobre el clavo le comunica una aceleración dada por:

$$a_c = \frac{F}{m_c} \quad (8.1)$$

Donde a_c y m_c son la aceleración y la masa del clavo, respectivamente. La fuerza de reacción del clavo sobre el martillo le produce a este último una desaceleración, que se expresa así:

$$a_m = \frac{F}{m_m} \quad (8.2)$$

Donde a_m y m_m son la aceleración y la masa del martillo, respectivamente. Como usualmente, $m_m > m_c$, de acuerdo con (8.1) y (8.2) la aceleración del clavo es mayor que la desaceleración del martillo.

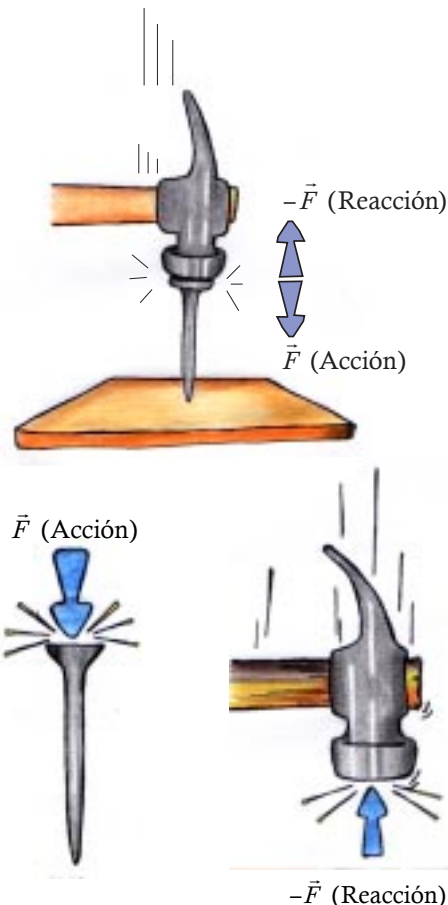


Fig. 8.5 Interacción entre un clavo y un martillo que lo golpea.

Ejemplo 8.2

¿La piedra cae hacia la Tierra o la Tierra cae hacia la piedra?

Solución

Considera una piedra de masa 1 kg que se deja caer sobre la superficie terrestre, tal como se muestra en la fig 8.6. De acuerdo con la segunda ley de Newton, la piedra es atraída por la Tierra con una fuerza (acción) dada por:

$$F = mg = 1 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 = 9,8 \text{ N}$$

Según la tercera ley de Newton, la piedra atrae a la Tierra con una fuerza (reacción) de igual magnitud y sentido contrario. Es decir, la piedra atrae a la Tierra con una fuerza de 9,8 N. Sin embargo, sólo percibimos que “la piedra cae hacia la Tierra”, ya que el movimiento que apreciamos es el de la piedra. El movimiento de “la Tierra hacia la piedra” escapa a nuestra percepción. Esto puede explicarse considerando la aceleración que experimenta la Tierra, bajo el efecto de la fuerza que sobre ella ejerce la piedra. La masa de la Tierra es, aproximadamente, igual a $6 \cdot 10^{24}$ kg. La aceleración que experimenta bajo la acción de la piedra puede calcularse mediante la relación $a = F/m$:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{9,8 \text{ N}}{6 \cdot 10^{24} \text{ kg}} = 1,63 \cdot 10^{-24} \text{ m/s}^2$$

Una aceleración tan pequeña como la calculada, es lo que impide que el movimiento causado por la misma pueda ser apreciado.

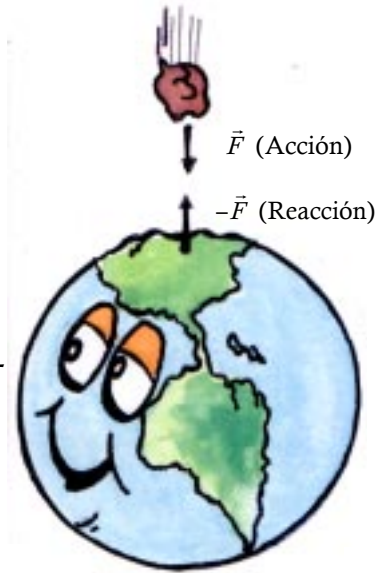


Fig. 8.6 La Tierra atrae a la piedra con la misma fuerza con que la piedra atrae a la Tierra.

Ejemplo 8.3

¿Qué es lo que impulsa al cohete?

Solución

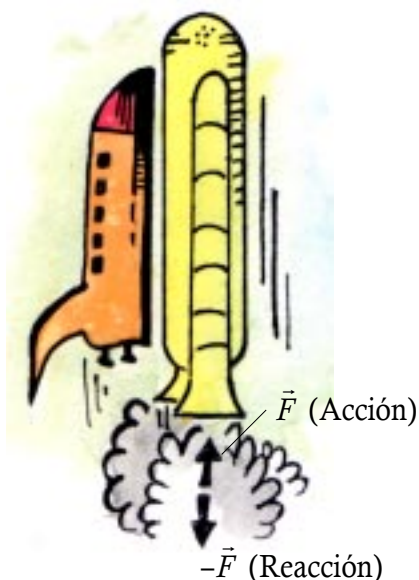


Fig. 8.7 La fuerza de reacción de los gases expulsados por los cohetes hace que éstos se impulsen.

Las imágenes de cohetes que ponen en órbita naves espaciales se han hecho muy familiares en nuestra vida cotidiana. En la fig. 8.7 se muestra un transbordador espacial, puesto en órbita mediante cohetes que lo llevan a la altura apropiada. El combustible de los cohetes es quemado y los gases de la combustión son expulsados con gran fuerza hacia abajo. De acuerdo con la tercera ley de Newton, se produce una fuerza de reacción (debida a los gases expulsados) de igual magnitud y sentido contrario que actúa sobre los cohetes, haciéndolos elevarse.

Se podría pensar, equivocadamente, que la presencia del aire es necesaria para que los cohetes puedan elevarse. Esto significaría que la impulsión de los cohetes se debería al apoyo de los mismos sobre la masa de aire que dejan detrás. Esa idea, además de no explicar el ascenso de acuerdo a la tercera ley de Newton, se refuta fácilmente al demostrarse que en el espacio vacío, donde no existe atmósfera, los cohetes pueden impulsarse al dejar salir los gases, productos de la combustión. En realidad, la presencia del aire es un obstáculo para el ascenso de un cohete, pues la fuerza de fricción, que el aire genera, se opone al movimiento ascendente.

Ejemplo 8.4

Acción y reacción hacen que un automóvil se mueva

Solución

Cuando un automóvil avanza por una carretera los cauchos del mismo giran hacia atrás, empujando también la carretera hacia atrás. A la vez, la carretera reacciona empujando las ruedas hacia delante y, por tanto, haciendo avanzar al automóvil. En la fig. 8.8 se muestran las fuerzas de acción y reacción sobre el vehículo.



Fig. 8.8 El automóvil avanza por efecto de la fuerza de reacción de la carretera sobre las ruedas.

8.3 MEDICIÓN DE LA MASA Y DE LA FUERZA

Hasta ahora hemos utilizado los conceptos de masa y de fuerza, sin poner atención a la forma cómo podemos medir esas cantidades. La masa de un cuerpo se puede medir mediante una balanza, tal como se muestra en la fig. 8.9. En el plato izquierdo de la balanza se coloca la masa desconocida M , mientras que en el plato derecho se colocan masas conocidas de valor total m , hasta que los brazos de la balanza se equilibren. En esta condición de equilibrio, se puede escribir:

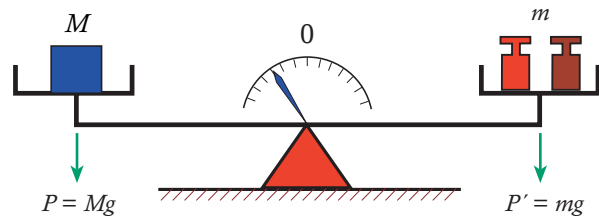


Fig. 8.9 Una balanza se puede usar para medir la masa.

$$P = Mg \quad P' = mg \quad \Rightarrow \quad Mg = mg \quad \Rightarrow \quad M = m$$

lo cual indica que la masa desconocida es igual a la masa colocada en el plato derecho.

Para medir pesos se utiliza, en lugar de una balanza de brazos, una balanza de resorte, como la mostrada en la fig. 8.10. Internamente, la balanza posee un resorte, cuya deformación (alargamiento) es proporcional a la fuerza que se ejerce sobre el mismo, siempre y cuando no se sobrepase al llamado límite elástico del material que se usa en el resorte. La escala graduada circular se calibra en función del estiramiento del resorte.



Fig. 8.10 Para medir el peso se utiliza una balanza de resorte.

Ejemplo 8.5

Una masa de 20 kg se cuelga de una balanza de resorte colocada dentro de un ascensor, como se indica en la fig. 8.11. a) Si el ascensor está detenido en la planta baja, ¿cuánto lee la balanza? b) Si el ascensor acelera hacia arriba con $a = 4 \text{ m/s}^2$, ¿cuál es la lectura de la balanza?

Solución

a) Si el ascensor está detenido, la masa de 20 kg origina una fuerza hacia abajo sobre la balanza dada por:

$$P = mg = 20 \cdot 9,8 \text{ N} = 196 \text{ N}$$

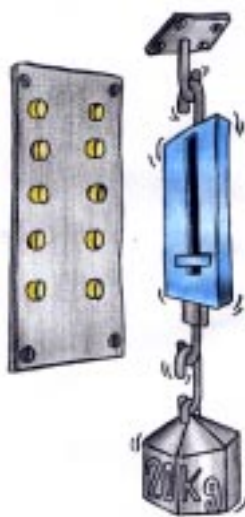


Fig. 8.11 Ejemplo 8.5.

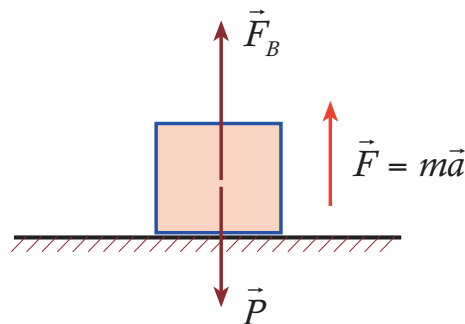


Fig. 8.12 Diagrama de cuerpo libre para la masa que va en el ascensor.

que corresponde a la lectura de la balanza. Hay que observar que, a la vez, de acuerdo a la tercera ley de Newton, la balanza ejerce una fuerza F_B sobre la masa, con dirección hacia arriba. Nótese, también, que el peso es equilibrado por la fuerza F_B ($P = F_B$).

b) En la fig. 8.12 se muestra el diagrama de cuerpo libre para la masa de 20 kg. P corresponde al peso y F_B a la fuerza con la cual la balanza hala el cuerpo hacia arriba. En este caso, estas dos fuerzas no están equilibradas, puesto que la masa se mueve con una aceleración de 4 m/s^2 . De acuerdo con la segunda ley de Newton, la diferencia entre F_B y P origina la fuerza aceleradora $m \cdot a$:

$$F_B - P = ma \Rightarrow F_B = P + ma \Rightarrow F_B = mg + ma = m(g + a)$$

Sustituyendo valores:

$$F_B = 20 \text{ kg} (9,8 + 4) \text{ m/s}^2 = 20 \cdot 13,8 \text{ N} = 276 \text{ N}$$

Lo que indica que cuando el ascensor acelera hacia arriba, la lectura de la balanza es mayor que cuando el ascensor está en reposo.

8.4 FUERZA DE GRAVEDAD Y ACELERACIÓN DE GRAVEDAD

Gravedad es el nombre al cual usualmente asociamos el hecho de que todo lo que sube debe bajar. La gravedad hace que los objetos caigan sobre la superficie terrestre. El origen de la gravedad inquietó durante mucho tiempo a los físicos, quienes trataron de explicar su origen, la fuente de la misma y su implicación en el movimiento de los cuerpos en el universo.

Usualmente, se habla de la *g* ravedad como una fuerza que surge entre la Tierra y los objetos que están cercanos a ella. Aun cuando, por adaptación del ser humano a la misma, la *g* ravedad puede pasar desapercibida, es una realidad de la cual no podemos abstraernos. A ese efecto al cual estamos acostumbrados, le llamamos, más precisamente, *fuerza de gravedad*, que se corresponde en la superficie terrestre con el peso de un objeto. La fuerza de gravedad es la responsable de que un cuerpo que cae sea acelerado hacia abajo mientras que un cuerpo que sube sea desacelerado también hacia abajo. La aceleración de *g* ravedad, que no debe confundirse con la fuerza de gravedad, tiene un valor de $9,8 \text{ m/s}^2$ cerca de la superficie terrestre.

No hay que confundir aceleración gravitatoria con fuerza de gravedad.



Ahora bien, al físico le interesa no sólo las consecuencias de un fenómeno sino su propia naturaleza: ¿qué origina la fuerza de *g* ravedad? ¿qué factores la afectan? ¿es posible su existencia fuera de la influencia de la Tierra? Esas preguntas inquietaron el pensamiento de Newton durante mucho tiempo, para luego plasmarse en relaciones matemáticas de fundamental importancia para el desarrollo de la Física.

8.5 LA LEY DE LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL

Al comienzo de los años 1600, Johannes Kepler, matemático y astrónomo alemán, analizó el movimiento de los planetas alrededor del Sol. Para establecer sus leyes, se basó en el trabajo de su maestro danés Ticho Brahe. Kepler estableció en su primera ley lo siguiente:

Las trayectorias de los planetas alrededor del Sol son elípticas, con el Sol colocado en uno de los focos de la elipse.

La proposición de Kepler sólo describe cómo se mueven los planetas alrededor del Sol, pero no explica cuál es la causa de ese movimiento. Para Kepler había una especie de interacción entre el Sol y los planetas, la cual daba lugar a la fuerza que mantenía el movimiento. Sin embargo, él no asomaba la posibilidad de fuerzas interactuando entre los planetas.

Esta falta de explicación sobre la causa del movimiento elíptico de los planetas alrededor del Sol cautivó el pensamiento de Newton. La cosa resultaba más complicada aún, porque la Luna se mueve alrededor de la Tierra en una órbita circular. Como es conocido, el

movimiento inercial, no perturbado, es una línea recta. Las trayectorias, elíptica de los planetas y circular de la Luna, son indicativas de la presencia de fuerzas aceleradoras que producen el cambio constante en dirección de esos cuerpos celestes (recuerda que la aceleración y, por lo tanto, la fuerza que la produce, puede originarse en un cambio de dirección). De no existir esas fuerzas, los cuerpos celestes se moverían indefinidamente en línea recta.

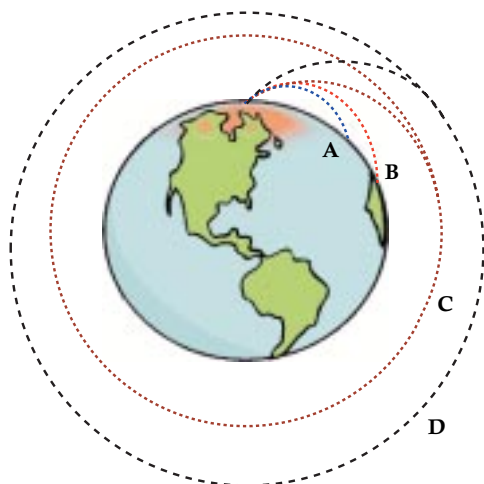


Fig. 8.13 Si se aumenta la velocidad a la cual es lanzada una bala de cañón desde un punto de la Tierra, eventualmente la bola se convierte en un satélite terrestre.

¿Qué relación podría existir entre el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra y la caída libre de un objeto sobre la superficie terrestre? Se dice que Newton estableció esa relación cuando, descansando en una huerta, una manzana cayó sobre su cabeza. Independientemente de que esto haya sido un mito o una realidad, el razonamiento de Newton se ilustra en la fig. 8.13: si, desde una posición muy elevada sobre la superficie terrestre, se lanzara horizontalmente una bala de cañón, ésta seguiría en línea recta, a no ser por la fuerza de gravedad, que la hace caer a la Tierra en el punto A. Si se incrementa la velocidad de lanzamiento, la bala de cañón extiende su trayectoria hasta caer en el punto B. Si, posteriormente, la bala de cañón es lanzada horizontalmente a una velocidad tal

que su trayectoria coincida con la curvatura de la Tierra, la bala se convierte en un satélite capaz de orbitar alrededor de nuestro planeta (trayectoria C en la fig. 8.13).

Newton argumentaba que la bala de cañón “cae *alrededor* de la Tierra”, tal como lo hace la Luna, en lugar de “caer *hacia* la Tierra”, tal como lo hace un objeto sobre la superficie terrestre. La trayectoria D corresponde a una velocidad más alta que las anteriores dando origen a una órbita elíptica. De esta forma explicaba Newton la presencia de órbitas circulares y órbitas elípticas.

La capacidad para relacionar la caída de un objeto sobre la superficie terrestre con el movimiento de los cuerpos celestes, pone en evidencia la genialidad de Newton. Con su razonamiento, estableció que la fuerza que gobierna el movimiento de un objeto en la Tierra es la misma que rige el movimiento de objetos en el espacio extraterrestre.

Newton suponía que la fuerza de gravedad tenía que ver con la distancia: a menor distancia, mayor sería su valor y viceversa. Esto lo llevó a pensar que había una relación de la fuerza de gravedad inversamente proporcional con el cuadrado de la distancia. Es decir, como una primera aproximación podría escribirse:

$$F_g \sim \frac{1}{d^2} \quad (8.3)$$

Donde:

F_g : fuerza de gravedad o fuerza de atracción gravitacional.

d : distancia que separa los objetos.

$\sim$: símbolo que significa "proporcional a"

Además de la variación con la distancia dada por (8.3), de acuerdo con la segunda ley de Newton, la fuerza neta o resultante que da origen a una aceleración es proporcional a la masa del objeto acelerado:

$$F = m \cdot a$$

De lo anterior, puede inferirse que la fuerza de gravedad que produce la caída de un objeto hacia la Tierra, depende de la masa m_1 del mismo. Más aún, según la tercera ley de Newton, el objeto que cae sobre la Tierra también ejerce una fuerza igual y de sentido contrario sobre esta última. Luego, la fuerza de gravedad depende, también, de la masa m_2 de la Tierra. En general, para dos cuerpos cualesquiera de masas m_1 y m_2 , la fuerza de gravedad puede escribirse como:

$$F_g \sim \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} \quad (8.4)$$

cuya relación establece que la fuerza de gravedad es directamente proporcional a las masas de los objetos interactuantes e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Es decir, mientras mayor sean las masas de los dos objetos, mayor será F_g , mientras que, a medida que la distancia de los objetos aumenta, menor será F_g .

La relación (8.4) puede convertirse en una igualdad, utilizando una constante de proporcionalidad:

$$F_g = G \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} \quad (8.5)$$

A la constante G se le denomina *constante de Gravitación Universal* y a la relación (8.5) se le conoce como *ley de Newton de la Gravitación Universal*.

La constante G fue medida por Henr y Cavendish, un siglo después de la muerte de Newton y su valor es:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2 \quad (8.6)$$

Es importante hacer notar que la fuerza de gravedad existe no solamente entre la Tierra y otros objetos o entre el Sol y otros planetas. Es tan universal esta fuerza, que aparece entre tú y la persona frente de ti, o entre dos vehículos desplazándose cercanos uno al otro.

Ejemplo 8.6

La masa de la Tierra es aproximadamente igual a $5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ y su radio es de $6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$. ¿Cuál es la fuerza de atracción gravitacional sobre un automóvil de masa 1.200 kg ?

Solución

Como la constante G es igual a $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$, la relación (8.5) nos da la fuerza buscada:

$$F_g = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \frac{5,98 \cdot 10^{24} \cdot 1.200 \text{ kg}^2}{(6,37 \cdot 10^6 \text{ m})^2} = 11.795,85 \text{ N}$$



PIENSA Y EXPLICA



- 8.1** ¿Qué es una interacción desde el punto de vista de la Física?
- 8.2** Explica qué son las fuerzas de acción y reacción.
- 8.3** Describe las fuerzas de acción y reacción en los siguientes casos:
 - a) Una persona empuja una pared, como en la fig. 8.4.
 - b) Un martillo golpea un clavo, como en la fig. 8.5.

- c) Un cohete se impulsa hacia arriba, como en la fig. 8.7
- d) Un automóvil se desplaza por una calle, como en la fig. 8.8.
- e) Una persona camina sobre una superficie con rozamiento.
- f) Un arma es disparada.
- g) Un jugador de beisbol golpea una pelota con el bate.
- h) Un pájaro se impulsa al volar.

- 8.4** Considera una persona que camina bajo la lluvia. ¿Cuáles son las fuerzas que actúan sobre la misma? Identifica las fuerzas de acción y reacción.
- 8.5** Si un nadador se desplaza dentro de una piscina, ¿qué fuerza lo hace avanzar? Identifica las fuerzas de acción y reacción.
- 8.6** Describe las fuerzas de acción y reacción entre la Luna y la Tierra.
- 8.7** Cuando alguien camina, empuja con sus piernas a la Tierra hacia atrás, ¿por qué ese movimiento no se nota?
- 8.8** ¿Es necesaria la presencia del aire alrededor de un cohete, para que éste pueda impulsarse?
- 8.9** ¿Qué le pasaría a tu peso si la masa de la Tierra aumenta un 10%?
- 8.10** ¿Por qué rebota una bola al pegar contra el suelo? Identifica las fuerzas de acción y reacción que entran en juego.
- 8.11** ¿Qué relación hay entre las masas de los cuerpos y la fuerza de atracción de los mismos?
- 8.12** No es lo mismo golpear una pared con una fuerza de 100 N que golpear, con la misma fuerza, a un pedazo de papel suspendido. Da una explicación de esta diferencia, usando las leyes de Newton.
- 8.13** ¿Por qué los cuerpos celestes se mueven según órbitas circulares o elípticas y no en línea recta?
- 8.14** ¿Qué significa la expresión “La Luna cae alrededor de la Tierra”, según el razonamiento de Newton?
- 8.15** ¿Qué relación hay entre la fuerza de gravedad y la distancia?

- 8.16** Cuando alguien, al desembarcarse de un bote, se lanza hacia el muelle se producen fuerzas de acción y reacción. Descríbelas. Ver fig. 8.15.
- 8.17** ¿Cuál es el valor y las unidades de la constante de gravitación universal?
- 8.18** Si dos objetos se atraen entre sí con una fuerza de 20 N y se duplica la distancia entre los mismos, ¿cuánto vale la nueva fuerza de atracción?
- 8.19** El ejemplo del caballo que hala una carreta, tipifica la confusión que se puede presentar cuando se trata de aplicar la tercera ley de Newton. Tal como se muestra en la figura 8.16, si el caballo hala a la carreta y la carreta hala al caballo, **a)** ¿Por qué se mueven ambos? **b)** ¿No es la fuerza resultante igual a cero, por lo cual no debe producirse desplazamiento? **c)** ¿Qué fuerzas horizontales actúan sobre la carreta? **d)** ¿Qué fuerzas horizontales actúan sobre el caballo? **e)** ¿Qué fuerzas horizontales se ejercen sobre el sistema caballo – carreta, tomado como un todo? **f)** Si el caballo quiere aumentar su velocidad, ¿tendrá que hacer más fuerza sobre el piso o sobre la carreta?
- 8.20** El planeta Júpiter tiene una masa 300 veces más grande que la Tierra. Podría pensarse que un objeto sobre su superficie pesaría 300 veces más que en la Tierra; sin embargo, su peso es de sólo aproximadamente 3 veces más que en la Tierra ¿Por qué?



Fig. 8.15 Piensa y explica 8.16.



Fig. 8.16 Piensa y explica 8.19.

CAPÍTULO 9



Centro de Masa y Centro de Gravedad

9.1 CENTRO DE MASA

Consideremos un sistema de dos masas, unidas por una barra liviana, tal como se muestra en la fig. 9.1. Si una fuerza $\vec{F}$ es aplicada cerca de la masa m_1 , fig. 9.1(a), el conjunto se traslada hacia la derecha y a la vez, gira en el sentido de giro de las agujas del reloj. Si dicha fuerza se aplica en un punto cercano a la masa m_2 , fig. 9.1(b), el conjunto se traslada hacia la derecha y, al mismo tiempo, gira en sentido contrario al giro de las agujas del reloj. En ambos casos, se produce tanto un movimiento de traslación como uno de rotación. Sin embargo, si la fuerza $\vec{F}$ se aplica a un punto especial llamado *centro de masa* (CM), el sistema de masas se traslada sin rotar. Esto sugiere que el sistema de masas m_1 y m_2 puede ser reemplazado por una masa de valor $m_1 + m_2$ situada en el centro de masa, sobre la cual la fuerza $\vec{F}$ tiene el mismo efecto que ejerce sobre dicho sistema.

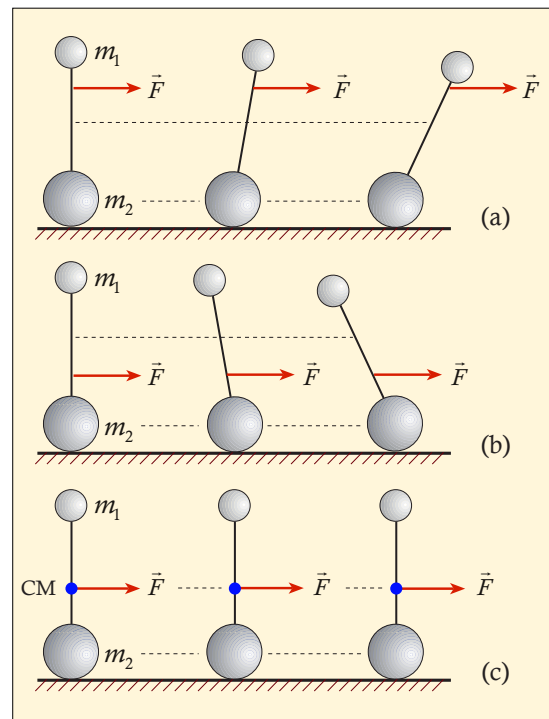


Fig. 9.1 El sistema de masas m_1 y m_2 se traslada hacia la derecha y: a) Rota en el sentido de giro de las agujas del reloj. b) Rota en sentido contrario a las agujas del reloj. c) No rota, porque $\vec{F}$ se aplica al centro de masa.

Todo objeto o cuerpo posee un centro de masa, en el cual puede suponerse concentrada toda la masa del mismo. Cuando se trata de objetos simétricos y de densidad uniforme, tales como una esfera o un cilindro, el centro de masa coincide con el centro geométrico de los mismos. Si se trata de objetos de formas irregulares, el centro de masa se encuentra cerca de donde haya mayor concentración de masa. En la fig. 9.2 se muestran una pelota de beisbol, un bate y una forma irregular que semeja una amiba. Para la pelota, el CM está situado en su centro geométrico. Para el bate y la forma irregular, el CM se encuentra donde ha y más concentración de masa.

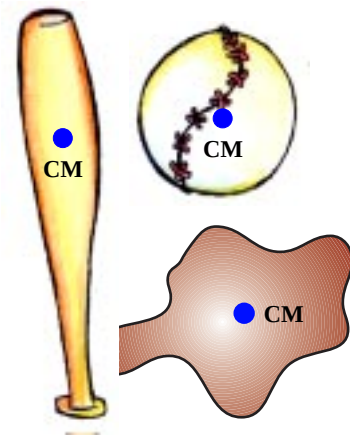
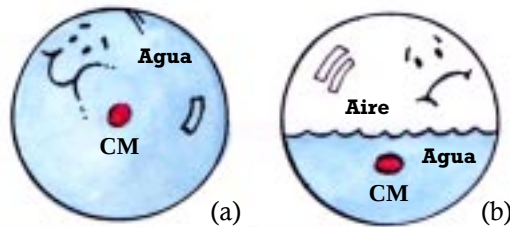


Fig. 9.2 Centro de masa para varios objetos. Cualquier fuerza aplicada al CM hace que el objeto se traslade sin girar. Toda la masa del objeto puede considerarse concentrada en el centro de masa.

Fig. 9.3 Cuando la distribución de masa no es uniforme como en (b), el CM se ubica donde hay mayor concentración de masa.



Si el objeto no posee una distribución uniforme de masa, el centro de masa se ubica donde existe mayor densidad. Así, por ejemplo, si se tiene un tanque esférico lleno totalmente de agua, su CM está situado en el centro geométrico del tanque. Si el tanque no está totalmente lleno, como se ilustra en la fig. 9.3(b), su CM se ubica en la porción cubierta por el agua.

Es interesante comparar la trayectoria de un objeto simétrico cuando se lanza hacia arriba, en cierto ángulo con una línea horizontal. Tomemos como ejemplo una pelota de béisbol, cuyo CM corresponde a su centro geométrico y un pez, cuyo CM está cerca de su cabeza, ya que allí se concentra su masa. En la fig. 9.4 se dibujan ambas trayectorias. Se produce, en los dos casos, un movimiento parabólico, que tiene como referencia el centro de masa de la pelota y del pez. El centro de masa de ambos se mueve del mismo modo que lo haría una partícula cuya masa, en los dos casos, estuviera concentrada en el CM. Observa que, aun cuando el pez parece girar en forma descontrolada, su CM recorre una trayectoria regular (parabólica).

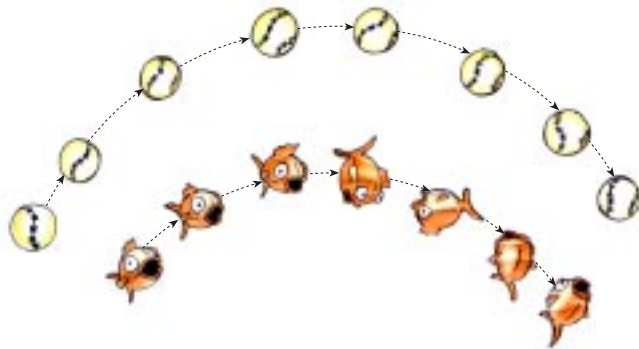


Fig. 9.4 Aun cuando un objeto parezca girar en forma irregular al ser lanzado, su CM describe una trayectoria regular, en este caso, una parábola.

9.2 CENTRO DE GRAVEDAD

La masa y el peso de un cuerpo están estrechamente ligados mediante la relación $P = mg$. El peso de un cuerpo corresponde a la fuerza con la cual la Tierra atrae a la masa del mismo.

Consideremos una lámina plana de hierro de espesor muy delgado, como se muestra en la fig. 9.5. Ésta puede suponerse constituida por un gran número de pequeñas masas circulares, cada una de las cuales está sometida a la acción de la fuerza de la gravedad, fig. 9.5(a). La fuerza resultante, $\vec{F}$, es la suma de cada una de las fuerzas individuales sobre las masas pequeñas. El centro de gravedad, que designaremos como CG, es el punto de la lámina donde puede considerarse que se concentra el peso de la misma. De acuerdo a esto, podemos pensar que el peso de la lámina es equivalente al peso de una partícula, cuya masa es la suma de las masas de cada uno de los elementos circulares y que está ubicada en el centro de gravedad.

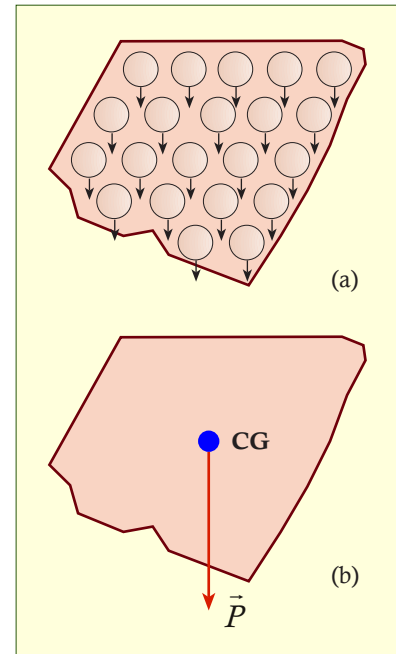


Fig. 9.5 El centro de gravedad es el punto donde puede considerarse aplicado el peso de un objeto.

9.3 ¿COINCIDE EL CENTRO DE MASA CON EL DE GRAVEDAD?

El centro de masa es un punto de un objeto, en el cual se puede considerar concentrada toda la masa del mismo. A los efectos del uso de la segunda ley de Newton ($F = ma$), por ejemplo, la fuerza puede considerarse aplicada al centro de masa, aun cuando la masa pueda estar distribuida en forma irregular. En la fig. 9.6 se ilustra este concepto.

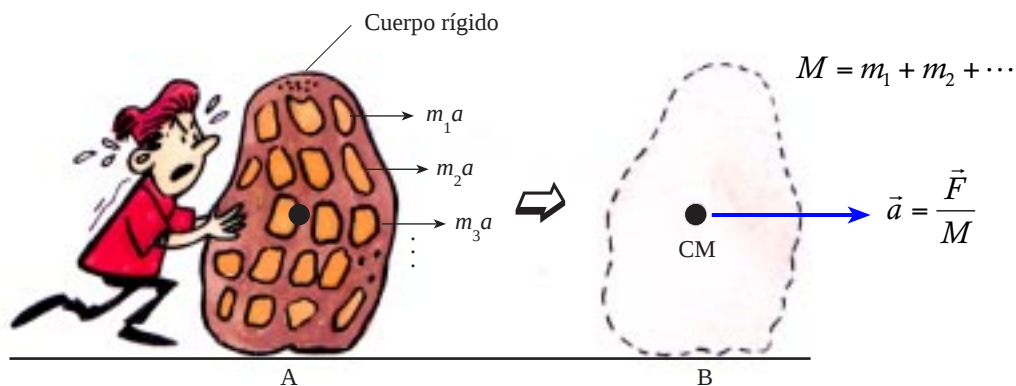


Fig. 9.6 El hombre produce, mediante una fuerza $\vec{F}$, un movimiento de traslación en el objeto mostrado. Tanto la trayectoria como la aceleración serían las mismas, si se considera toda la masa concentrada en el CM.

El hombre aplica una fuerza $\vec{F}$ a un cuerpo rígido (que no se deforma por la acción de fuerza), lo que origina en el mismo un movimiento de traslación que lo lleva desde la posición A hasta la posición B. Como consecuencia, el cuerpo acelera ($a = F/M$) durante el recorrido. Si consideramos que el cuerpo de masa total M está formado por un gran número de masas pequeñas $m_1, m_2, m_3, \dots$, cada una de ellas estará sometida a la misma aceleración a y podemos escribir:

$$F = m_1 a + m_2 a + m_3 a \dots = (m_1 + m_2 + m_3 \dots) a \quad (9.1)$$

Pero:

$$m_1 + m_2 + m_3 \dots = M \text{ (Masa total del cuerpo)} \quad (9.2)$$

Luego,

$$F = M a \quad (9.3)$$

Si toda la masa del objeto se concentrara en el centro de masa y se aplicara allí la misma fuerza $\vec{F}$, el CM recorrería una trayectoria similar y alcanzaría igual aceleración que el objeto original.

El centro de gravedad (CG) fue definido como un punto de un objeto donde se puede suponer concentrado todo el peso del mismo y, por lo tanto, sería el punto de aplicación de la fuerza correspondiente al peso del objeto. Veamos la relación entre el CM y el CG. Para ello, consideremos de nuevo un objeto dividido en un gran número de masas $m_1, m_2, m_3, \dots$ y que está sometido a la fuerza de gravedad, tal como se muestra en la fig. 9.7. Cada una de las pequeñas masas $m_1, m_2, m_3, \dots$, está sometida a la fuerza de gravedad, de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$P_1 = m_1 g_1, \quad P_2 = m_2 g_2, \quad P_3 = m_3 g_3, \dots \quad (9.4)$$

El peso total del objeto está dado por:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots = m_1 g_1 + m_2 g_2 + m_3 g_3 + \dots \quad (9.5)$$

Ahora bien, hemos usado los valores distintos $g_1, g_2, g_3, \dots$ para la aceleración de gravedad, para significar con esto que g puede variar con la altura de un objeto en relación con el centro de la Tierra o con la superficie terrestre. En realidad, esta variación es tan pequeña que, en la mayoría de los casos, podemos considerar que $g_1 = g_2 = g_3 \dots = g = 9,8 \text{ m/s}^2$, y (9.5) nos queda como:

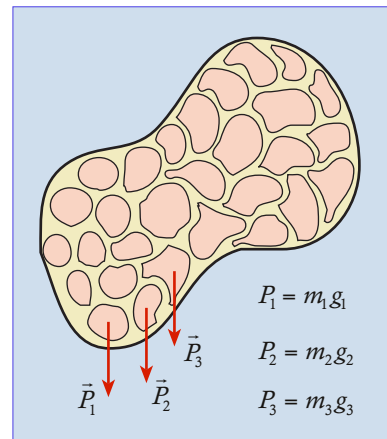


Fig. 9.7 Cada una de las masas que forman el objeto son sometidas a la fuerza de gravedad.

$$P = (m_1 + m_2 + m_3 + \dots)g \quad (9.6)$$

Sustituyendo $m_1 + m_2 + m_3 + \dots$ por M :

$$P = Mg \quad (9.7)$$

Si observamos las relaciones (9.3) y (9.7) concluiremos que son similares si la aceleración, a , se reemplaza por la aceleración de gravedad, g . Entonces, bajo la condición $g = \text{constante}$, la ubicación del centro de masa coincide con la del centro de gravedad. Con el fin de clarificar más aún la diferencia entre el CM y el CG, consideremos la fig. 9.8.

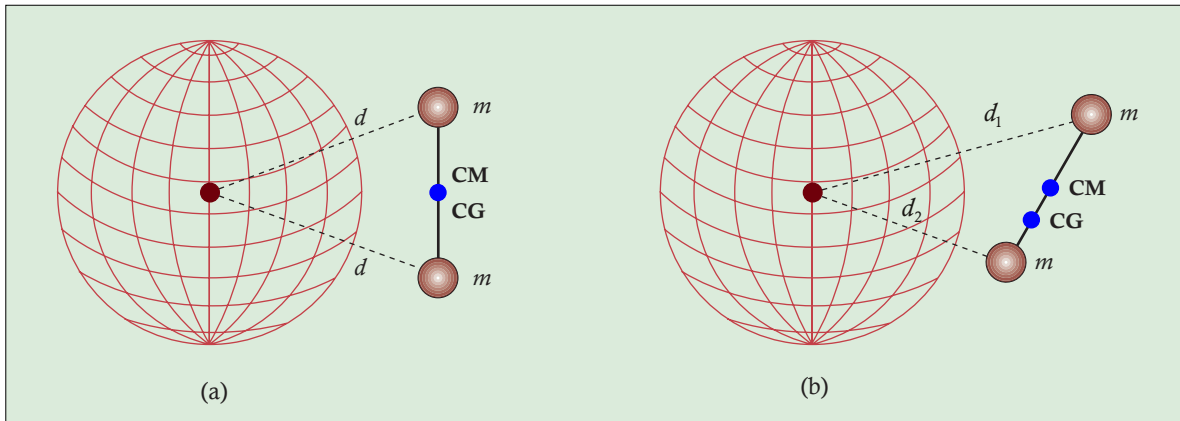


Fig. 9.8 a) Si las masas están situadas a igual distancia del centro de la Tierra, el CM y el CG coinciden. b) $d_1 \neq d_2$ y el CM y el CG no coinciden.

En la fig. 9.8 (a) se presentan dos masas de valor m unidas por una barra y colocadas por encima de la superficie terrestre, de manera que ambas masas se encuentran a igual distancia del centro de la Tierra. El CM se ubica en la mitad de la barra. Como las distancias, d , a las dos masas son iguales, éstas son atraídas con igual fuerza hacia la Tierra y, por lo tanto, el centro de masa coincide con el centro de gravedad.

Por el contrario, en la fig. 9.8 (b) las masas se encuentran a diferentes distancias d_1 y d_2 , del centro de la Tierra y son atraídas con fuerzas distintas. Como $d_2 < d_1$, la masa más cercana (distancia d_2) es atraída con mayor fuerza hacia la Tierra y el centro de gravedad (CG) se desplaza hacia esa masa. En este caso, el CM y el CG no coinciden.

Se debe hacer notar que, únicamente cuando la barra de unión entre las dos masas de la fig. 9.8 (b) es muy larga, puede establecerse una diferencia entre el CM y el CG. Para ello, las distancias d_1 y d_2 deben ser suficientemente diferentes, de manera que la fuerza de atracción que ejerce la Tierra sobre las masas sea significativamente distinta. Por ello, podemos afirmar:

Para objetos situados cerca de la superficie terrestre (o de cualquier otro cuerpo celeste) el centro de masa no difiere significativamente del centro de gravedad.

De lo descrito anteriormente, también podemos establecer lo siguiente:

1. El centro de masa de un objeto no depende de su posición en el espacio. Es función de la naturaleza del objeto (su composición química) y de la forma (distribución volumétrica) de su masa. El centro de masa de un objeto siempre existe.
2. El centro de gravedad de un objeto sobre la superficie terrestre o, de otro cuerpo celeste, depende de la distancia (posición espacial) al cuerpo que ejerce la atracción gravitatoria. A distancias muy alejadas de cualquier influencia gravitatoria, el CG no existiría, ya que el objeto no estaría sometido a fuerza alguna.

9.4 DETERMINACIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD

CG de un objeto simétrico

El centro de gravedad de un objeto simétrico de composición uniforme está ubicado en su centro geométrico. Es un punto en el que puede considerarse concentrado todo el peso del objeto y actúa como centro de balance del mismo. Para confirmar esto último, consideremos una barra de sección cuadrada, como se muestra en la fig. 9.9. Cada uno de los pequeños cubos, en los cuales se ha dividido la barra, tiene un peso $\vec{p}$. La suma de esos pesos da el peso total de la barra, $\vec{P}$. Si se trata de equilibrar la barra con un dedo, éste deberá colocarse en el centro de gravedad de la misma. El peso total $\vec{P}$ es equilibrado por la fuerza de magnitud también igual a P , que ejerce el dedo hacia arriba. Es como si todo el peso de la barra estuviese concentrado en su centro de gravedad.

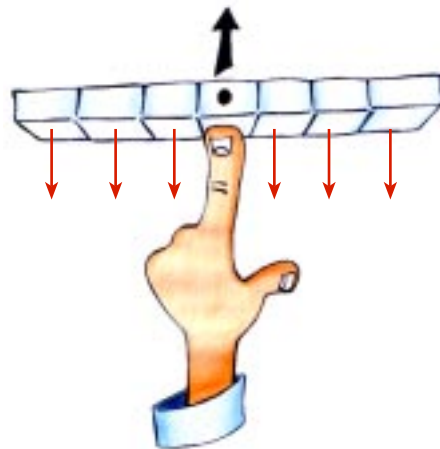


Fig. 9.9 La barra se equilibra si el dedo se coloca en el CG de la misma.

CG de un objeto de forma irregular

Cuando un cuerpo de densidad uniforme tiene forma irregular, su centro de gravedad es más difícil de determinar por simple inspección. En la fig. 9.10 se muestra un procedimiento experimental para determinar el CG de un objeto plano de forma irregular. Se procede de la siguiente manera:

- a. Se hacen 2 o 3 agujeros en el objeto de forma irregular (puntos A, B y C).
- b. Se introduce una barrita delgada en el agujero A, a la cual se cuelga una plomada. La barrita puede ser un clavo y la plomada un hilo, al cual se ata un pequeño peso. Se espera hasta que el hilo y el cuerpo dejen de moverse. Es importante realizar este experimento donde no haya corrientes de aire. Con un lápiz se marca la línea vertical señalada por el hilo. El CG del objeto se encuentra sobre dicha línea vertical (¿por qué?).
- c. Se repite el procedimiento dado en (b) con los agujeros B y C del objeto. El punto donde se cortan las líneas verticales dibujadas corresponde al CG.

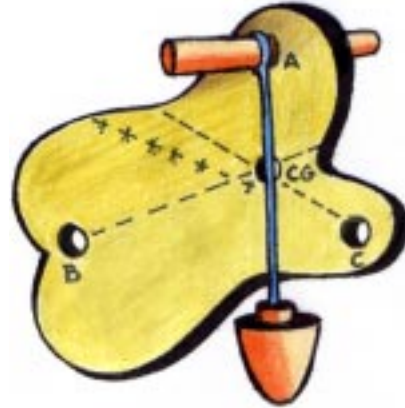


Fig. 9.10 Procedimiento experimental para determinar el CG de un objeto plano de forma irregular.

CG fuera del objeto material

El CG de un objeto no necesariamente está ubicado en un punto dentro del mismo. Por ejemplo, el CG de un anillo circular coincide con su centro geométrico, donde no existe materia correspondiente al anillo. En la fig. 9.11 se muestran varios casos con la característica mencionada.

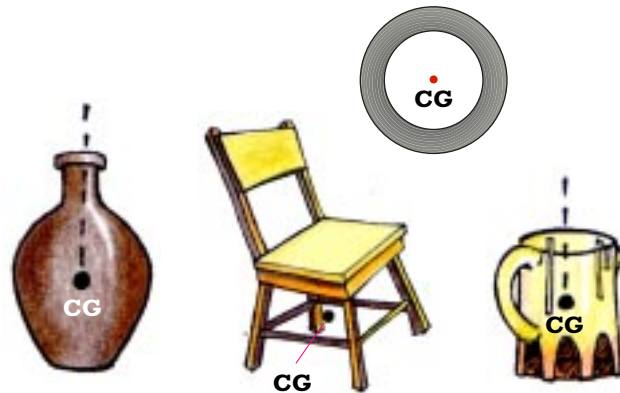


Fig. 9.11 En algunos objetos, el CG no se encuentra dentro de la materia que los constituye.

Determinación analítica del CM de dos masas

En general, la determinación analítica del centro de masa de un objeto irregular de 3 dimensiones es una labor complicada. En algunos casos sencillos como el de varias masas de forma regular ubicadas en un plano, es posible una solución analítica sencilla.

Consideremos dos masas de forma esférica de valores m_1 y m_2 separadas una distancia d , como se muestra en la fig. 9.12(a). El CM del sistema está en la línea que une a las dos masas y se ubica entre las mismas. Si se hace coincidir el eje X de un sistema de coordenadas cartesianas con la línea de separación de las masas, se obtiene la fig. 9.12 (b). El CM del sistema se puede obtener mediante la relación:

$$x_{CM} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}$$

9.8

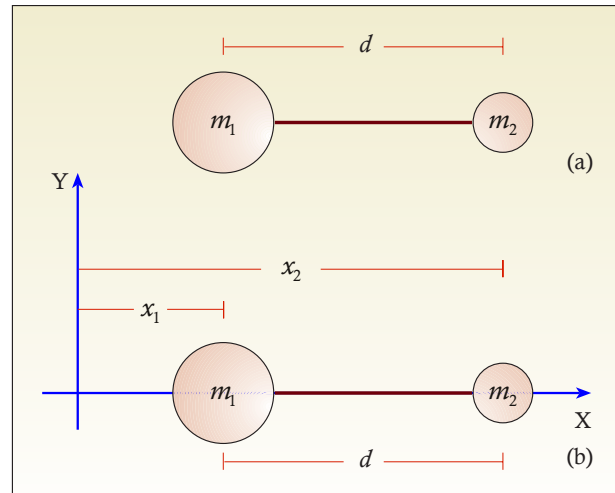


Fig. 9.12 Centro de masa de dos cuerpos esféricos.

Si las dos masas son iguales ($m_1 = m_2$), el CM del sistema nos queda como:

$$x_{CM} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2} = \frac{m(x_1 + x_2)}{2m} = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (9.9)$$

que es el punto medio de la distancia entre las dos masas, ya que:

$$d = x_2 - x_1 \quad \Rightarrow \quad x_2 = x_1 + d$$

Sustituyendo en (9.9):

$$x_{CM} = \frac{x_1 + x_1 + d}{2} = \frac{2x_1 + d}{2} = x_1 + \frac{d}{2}$$

Ejemplo 9.1

Se tienen dos masas de 10 kg y 4 kg separadas por una distancia de 2 m. ¿Dónde quedan el CM y el CG del sistema?

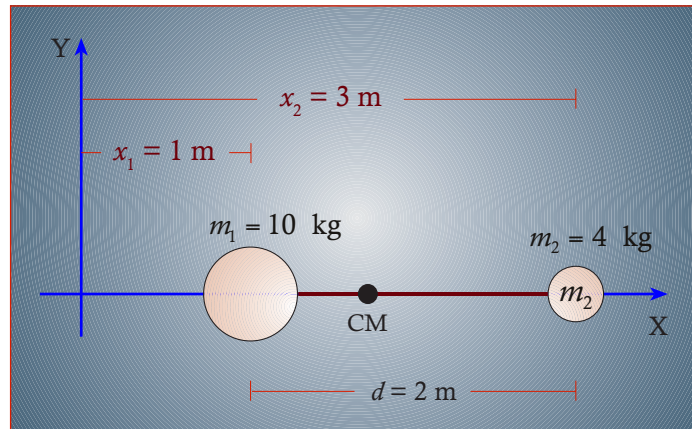


Fig. 9.13 Ejemplo 9.1.

Solución

En la fig. 9.13 se muestra la disposición de las masas en un plano cartesiano. La línea de unión entre ellas se hace coincidir con el eje X. La masa m_1 se coloca de manera que su centro esté a 1 m del origen. Esta ubicación es completamente arbitraria y no altera el resultado a obtener. Es decir, puede seleccionarse cualquier distancia desde el origen a la masa m_1 . Al fijar la coordenada $x_1 = 1 \text{ m}$, automáticamente queda determinada la coordenada $x_2 = x_1 + d = 3 \text{ m}$.

De acuerdo a la relación (9.8), la coordenada x_{CM} del centro de masa está dada por:

$$x_{CM} = \frac{10 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m} + 4 \text{ kg} \cdot 3 \text{ m}}{10 \text{ kg} + 4 \text{ kg}} = \frac{(10 + 12) \text{ kgm}}{14 \text{ kg}} = \frac{22}{14} \text{ m} = 1,57 \text{ m}$$

La coordenada del CG es la misma del CM.

Determinación del CM de n masas localizadas sobre una línea recta

Para varias masas localizadas a lo largo de una línea recta el CM está dado por:

$$x_{CM} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 + \cdots + m_nx_n}{m_1 + m_2 + m_3 + \cdots + m_n} \quad (9.10)$$

Donde $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$ son las distintas masas y $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ son las distancias desde el centro de cada una de las masas hasta el origen del sistema de coordenadas.

Ejemplo 9.2

Determina el CM para el sistema de masas mostrado en la fig 9.14(a). $m_1 = 3$ kg, $m_2 = 2$ kg, $m_3 = 5$ kg.

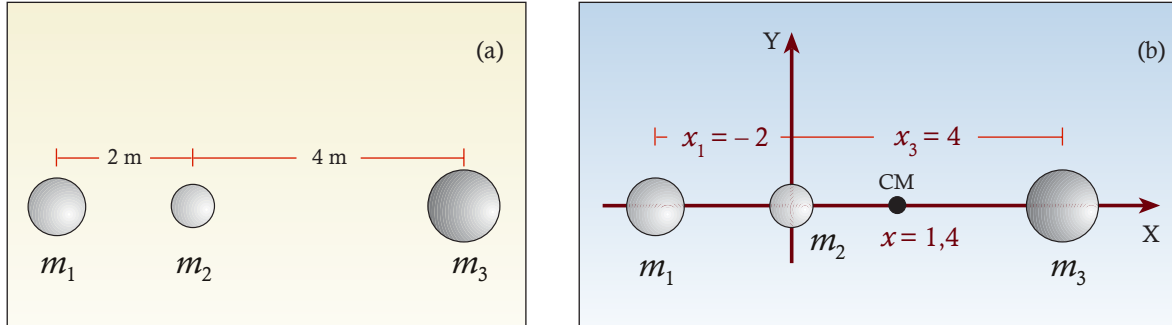


Fig. 9.14 a) Sistema de masas para el ejemplo 9.2. b) Sistema de masas con ejes de referencia X-Y.

Solución

En la fig. 9.14(b) el sistema está referido a un eje cartesiano X-Y, de manera tal que el origen de este último coincide con el centro de la masa m_2 . De acuerdo con la relación (9.10), el CM puede expresarse como:

$$x_{CM} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3}{m_1 + m_2 + m_3}$$

Donde $x_1 = -2$ m, $x_2 = 0$, $x_3 = 4$ m. Sustituyendo valores:

$$x_{CM} = \frac{3 \cdot (-2) + 2 \cdot (0) + 5 \cdot 4}{3 + 2 + 5} = \frac{-6 + 20}{10} = 1,4 \text{ m}$$

En la fig. 9.14(b) se señala la ubicación del CM.

Determinación del CM de masas situadas en el eje Y

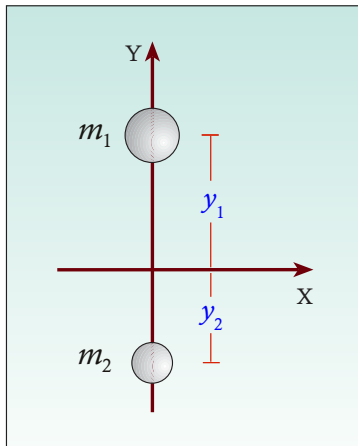


Fig. 9.15 CM para dos masas ubicadas sobre el eje Y.

Si, como se indica en la fig 9.15, las dos masas están situadas sobre el eje Y, el CM está dado por:

$$y_{CM} = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2}{m_1 + m_2} \quad (9.11)$$

En general, para n masas situadas sobre el eje Y se tendrá:

$$y_{CM} = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3 + \cdots + m_n y_n}{m_1 + m_2 + m_3 + \cdots + m_n} \quad (9.12)$$

Determinación del CM de masas distribuidas en el plano XY

Cuando las dos masas están distribuidas en el plano XY, como se muestra en la fig. 9.16, el CM tiene tanto componente en X, dada por la relación (9.8), como componente en Y, dada por (9.11), y está ubicado en la recta que une las dos masas.

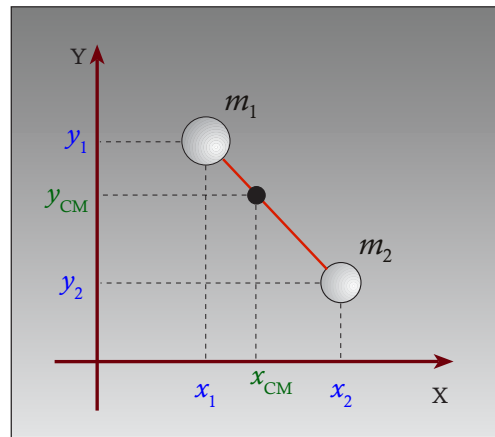


Fig. 9.16 CM de masas distribuidas en un plano.

Ejemplo 9.3

En la fig. 9.17 se muestra un matamoscas usado comúnmente en hogares. Éste, en muchos casos, está formado por una varilla que calza en una rejilla, que es la parte usada para golpear a las moscas. Ambas partes son de plástico. Las masas de la varilla y de la rejilla son: $m_1 = 20$ g, $m_2 = 25$ g. La fig. 9.17 muestra la ubicación de los centros de masa CM_1 y CM_2 . Determina el CM del matamoscas.

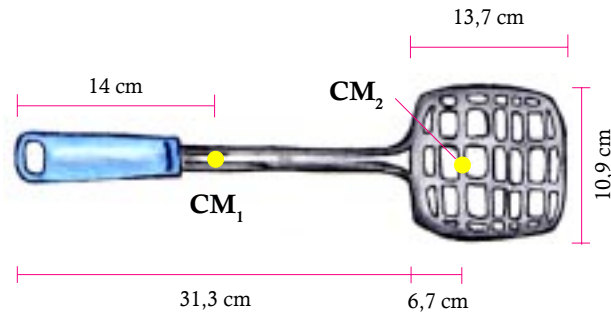


Fig. 9.17 Matamoscas para el ejemplo 9.3.

Solución

Como se conoce la posición del centro de masa y la masa de cada sección del matamoscas éstas pueden ser representadas por masas puntuales tal como se muestra en la fig. 9.18. El eje del matamoscas se colocó sobre el eje Y. El CM de la varilla está a $y_1 = 14$ cm, mientras que el de la rejilla está a:

$$y_2 = 31,3 \text{ cm} + 6,7 \text{ cm} = 38 \text{ cm}$$

Usando (9.11) con $m_1 = 0,02$ kg y $m_2 = 0,025$ kg:

$$y_{CM} = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2}{m_1 + m_2} = \frac{0,02 \cdot 0,14 + 0,025 \cdot 0,38}{0,02 + 0,025} \text{ m}$$

$$y_{CM} = \frac{0,0028 + 0,0095}{0,045} = \frac{0,0123}{0,045} = 0,273 \text{ m}$$

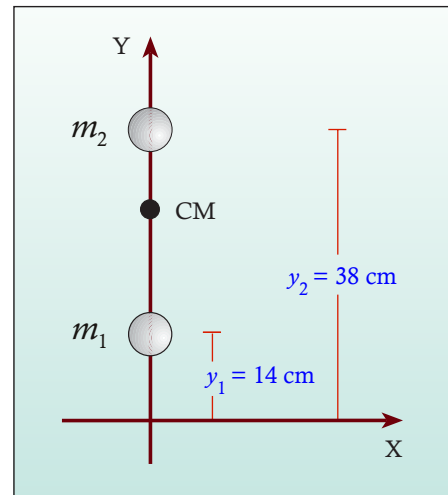


Fig. 9.18 Distribución de los centros de masa del matamoscas de la fig. 9.17.

Es decir, el centro de masa del matamoscas se encuentra a 27,3 cm de uno de los extremos de la varilla. En la fig. 9.18 se señala la ubicación aproximada del CM.

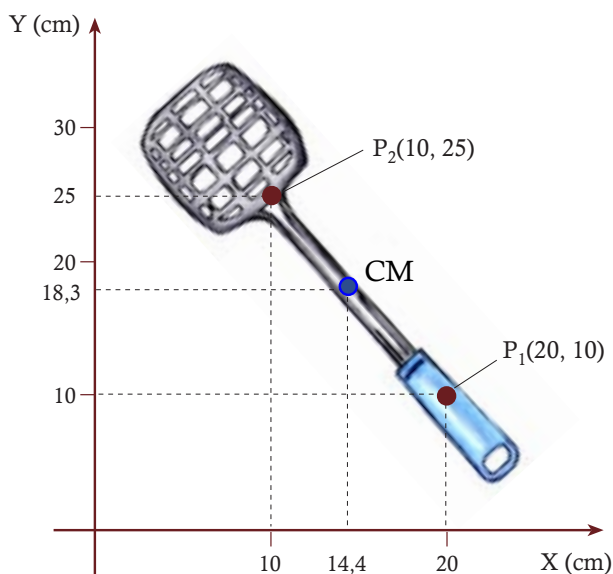


Fig. 9.19 CM de un matamoscas en un plano XY.
Ejemplo 9.4.

Ejemplo 9.4

Un matamoscas parecido al de la fig. 9.17 se coloca en un plano XY como se muestra en la fig. 9.19. Los centros de masas de la varilla y de la rejilla caen en los puntos P_1 y P_2 indicados en esa figura. Si m_1 y m_2 son las mismas masas del ejemplo 9.3, determina la ubicación del CM en el plano XY.

Solución

Tanto la varilla como la rejilla pueden reemplazarse por masas $m_1 = 0,020$ kg y $m_2 = 0,025$ kg colocadas en P_1 y P_2 , respectivamente. Usando las relaciones (9.8) y (9.11):

$$x_{CM} = \frac{0,020 \cdot 20 + 0,025 \cdot 10}{0,020 + 0,025} = 14,44 \text{ cm}$$

$$y_{CM} = \frac{0,020 \cdot 10 + 0,025 \cdot 25}{0,045} = 18,33 \text{ cm}$$

En la fig. 9.19 se indica la ubicación del CM.



PIENSA Y EXPLICA



- 9.1** ¿Qué entiendes por centro de masa?
- 9.2** ¿Por qué el CM de algunos objetos no está situado en su centro geométrico?
- 9.3** ¿Dónde se ubica el CM de un objeto simétrico de densidad uniforme?

- 9.4** ¿Dónde se ubica el CM de un objeto simétrico de densidad no uniforme?
- 9.5** Describe la trayectoria de los objetos mostrados en la fig. 9.4.
- 9.6** Estima la ubicación del CM de los objetos mostrados en la fig. 9.20.



Fig. 9.20 Estima la ubicación del centro de masa para las figuras mostradas.

- 9.7** ¿Qué es el centro de gravedad de un objeto?
- 9.8** ¿Cuál es la diferencia entre centro de masa y centro de gravedad?
- 9.9** ¿Bajo qué condiciones podemos afirmar que el centro de masa coincide con el centro de gravedad?
- 9.10** Explica el significado del diagrama de la fig. 9.5.
- 9.11** Explica la aplicación de la segunda ley de Newton, en relación con el movimiento de un objeto cualquiera y su centro de masa (Fig. 9.6).
- 9.12** ¿Por qué una lavadora vibra en forma irregular y violenta cuando la ropa que se coloca en ella no está distribuida en forma balanceada?
- 9.13** ¿Por qué es prudente balancear la carga en una gandola cargada con refrescos?
- 9.14** Cuando un ferry es cargado con vehículos, ¿por qué se busca balancear la carga? ¿Qué tiene esto que ver con el centro de masa?
- 9.15** El centro de gravedad del edificio World Trade Center, en Nueva York, está separado alrededor de 1 mm de su centro de masa. ¿A qué se debe esta diferencia?

- 9.16** ¿Por qué podemos decir que el CM de un objeto siempre existe, mientras que el CG puede no existir?
- 9.17** ¿Cómo puedes obtener el CG de un objeto de forma simétrica?
- 9.18** ¿Cómo puedes obtener el CG de un objeto de forma irregular?
- 9.19** ¿Puede el CM de un objeto ubicarse fuera del mismo? Da algunos ejemplos
- 9.20** En la fig. 9.21 se presentan dos vasos que contienen agua. Ubica, aproximadamente, el CM de cada uno de ellos.
- 9.21** Una amiba es un microorganismo que cambia frecuentemente su forma (ver fig. 9.22) ¿Varía su CM al adquirir nuevas formas?

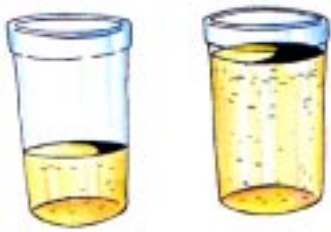


Fig. 9.21 ¿Dónde queda el centro de masa para los vasos con agua mostrados?

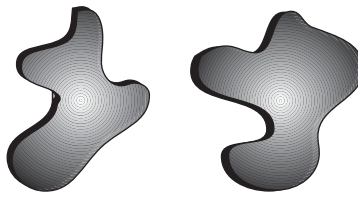


Fig. 9.22 ¿Varía el CM de la amiba al cambiar su forma?

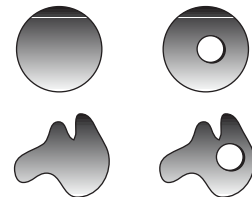


Fig. 9.23 ¿Varía el CM de los objetos mostrados al hacerles un agujero?

- 9.22** ¿Cuál es el CG de una nave interplanetaria alejada de la influencia de cualquier cuerpo celeste?
- 9.23** A los objetos mostrados en la fig 9.23 se les hace un agujero ¿Varía su CM?
- 9.24** ¿Dónde queda el CG de un hombre? ¿El de una mujer?
- 9.25** ¿Puede el CG de una persona modificarse al mover o contorsionar su torso? ¿Al alzar los brazos?

- 9.26** Usualmente, cuando los cauchos de un vehículo están desbalanceados, éste tiembla notablemente a cierta velocidad. Por ello se requiere colocar pedacitos de plomo en las r uedas del vehículo. ¿Cuál es el papel del plomo en relación con el CM?



PROBLEMAS



- 9.1** La relación (9.1) permite calcular el CM de objetos que descansan sobre el eje X:

$$x_{CM} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}$$

¿Puede ser utilizada la relación siguiente para determinar el CM?

$$x_{CM} = \frac{P_1 x_1 + P_2 x_2}{P_1 + P_2}$$

Donde P_1 y P_2 son los pesos de las masas. Justifica tu respuesta.

- 9.2** Una esfera de 4 kg se ubica sobre el eje X en $x = -4$ m y otra esfera de 6 kg se coloca en $x = 4$ m. Determina el CM de las esferas.
- 9.3** La distancia promedio entre el centro de la Tierra y el centro de la Luna es de $3,84 \cdot 10^8$ m. Si las masas de la Tierra y la Luna son $5,98 \cdot 10^{24}$ kg y $7,36 \cdot 10^{22}$ kg, respectivamente, determina el CM del conjunto Tierra – Luna.
- 9.4** Dos esferas de masas $m_1 = 200$ g y $m_2 = 800$ g, están separadas una distancia de 2 m, ¿a qué distancia de m_1 está el CM del sistema?

9.5 En la fig. 9.24 se muestra un poste de alumbrado constituido por un tubo vertical de radio constante y dos brazos que sostienen las luminarias. El tubo y cada uno de los brazos tienen masas de 280 kg y 25 kg, respectivamente. Usa un plano XY para determinar el CG del poste si los centros de masas del tubo vertical y de los brazos son los indicados en la figura.

9.6 En la fig. 9.25 se muestra un tanque esférico usado para almacenar agua en muchos hogares. El tanque es soportado por una plataforma horizontal de base cuadrada y una columna vertical. Determina el CM y el CG del sistema si las dimensiones y masas de los elementos que conforman la estructura son:

Tanque: radio = 0,60 m; $m_t = 1.000$ kg

Plataforma horizontal: lado = 1,20 m; alto = 10 cm, $m_p = 50$ kg

Columna vertical: altura = 5 m; $m_c = 200$ kg

9.7 La fig. 9.26 muestra un poste utilizado para despliegue de publicidad. El poste pesa 150 N y el rectángulo publicitario pesa 50 N. Determina, aproximadamente, el CM del conjunto.

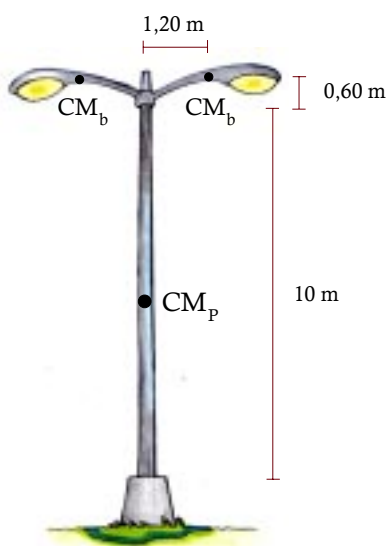


Fig. 9.24 Problema 9.5.

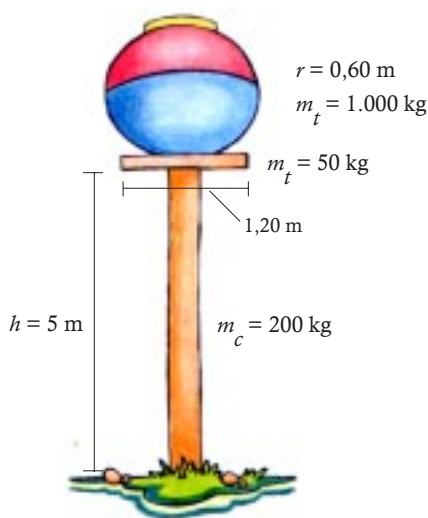


Fig. 9.25 Problema 9.6.

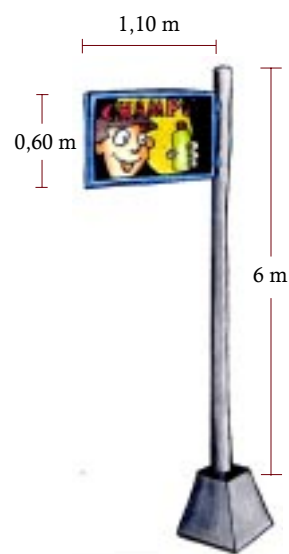


Fig. 9.26 Problema 9.7.

CAPÍTULO 10



Momento de torsión. Equilibrio.

10.1 MOMENTO DE TORSIÓN DE UNA FUERZA

Al aplicarse una fuerza a un objeto rígido, no deformable, éste se traslada, rota o, rota y se traslada. Así, cuando una persona camina, la fuerza que lo empuja (¿cuál?) produce un movimiento de traslación pura. Cuando la rueda de un parque de diversiones gira bajo la acción de la fuerza de un motor, se produce un movimiento de rotación pura. Cuando un ciclista aplica una fuerza a los pedales de una bicicleta, se originan, sucesivamente, movimientos de rotación y de traslación que producen el cambio de posición de la misma. En este último caso, mientras algunas partes de la bicicleta giran (las ruedas, el piñón), el conjunto completo se desplaza. La fig. 10.1 muestra los casos mencionados.

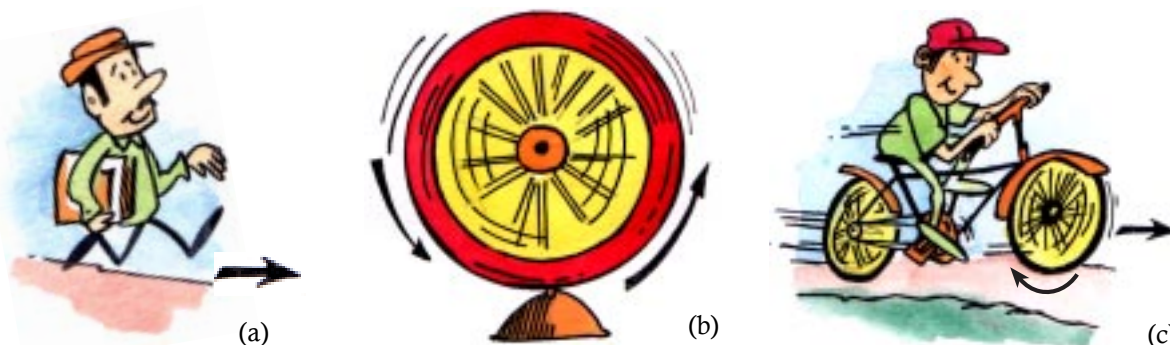


Fig. 10.1 Las fuerzas producen movimientos: a) De traslación pura. b) De rotación pura. c) De rotación y traslación.

El momento de torsión de una fuerza es una idea asociada con la capacidad de la misma para producir rotación en un objeto. Cada vez que alguien abre una puerta o gira el volante de un carro, ejerce una fuerza que origina una rotación. A este efecto se le conoce como *momento de torsión de la fuerza*.

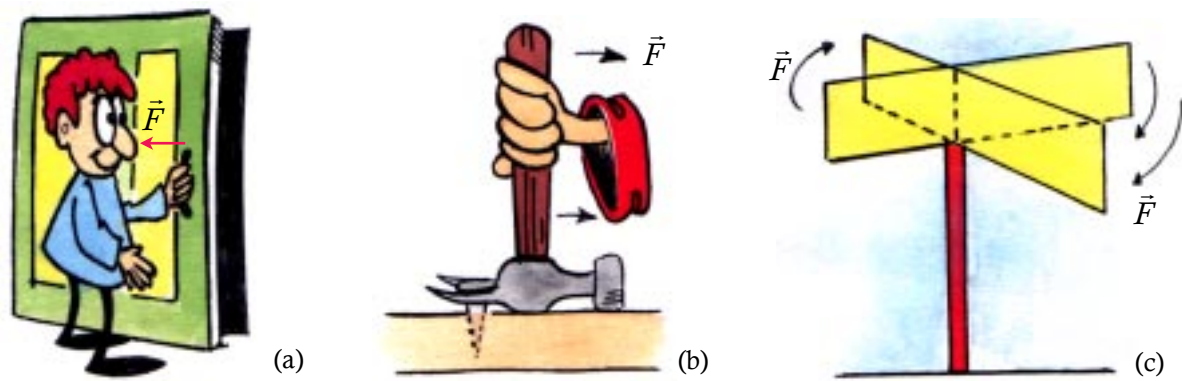


Fig. 10.2 Fuerzas que producen momentos de torsión: a) La fuerza ejercida por la persona hace que la puerta gire. b) La fuerza que se ejerce para sacar un clavo hace girar el martillo. c) El viento ejerce una fuerza que produce el giro de la lámina.

Si observamos con detenimiento la fig 10.2, notaremos que la acción de giro no es únicamente consecuencia de la presencia de una fuerza: hay que tomar en cuenta el eje o punto alrededor del cual el objeto gira, la dirección de la fuerza y la distancia entre el punto de aplicación de la fuerza y el eje o punto de giro. Tomemos como ejemplo la acción de extraer un clavo, usando un martillo. En la fig. 10.3 se ilustran varias maneras para hacerlo. El módulo de la fuerza $\vec{F}$ es igual en los tres casos.

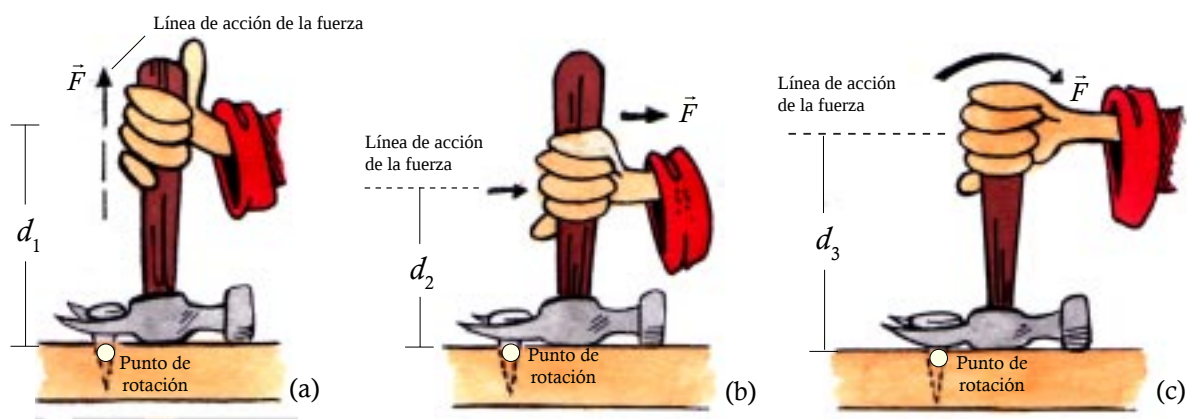


Fig. 10.3 a) No hay rotación. b) Hay rotación. c) Hay rotación. Es más fácil sacar el clavo en el caso (c) que en el caso (b), ya que la distancia d_1 es mayor que d_2 .

En la fig. 10.3(a), la fuerza se aplica a una distancia d_1 del punto de rotación situado en el clavo; sin embargo, por estar dirigida hacia arriba, sólo se produce una fuerza sobre el

martillo en dirección vertical y el cuerpo no gira. Para este caso el momento de torsión es nulo, ya que la combinación fuerza-distancia no produce giro alguno. La línea de acción de la fuerza es paralela al eje del martillo.

En la fig. 10.3(b), la línea de acción de la fuerza es perpendicular al eje del martillo, la distancia al punto de rotación es d_2 y el martillo gira en el sentido de las agujas del reloj. Bajo estas condiciones, la combinación fuerza-distancia produce rotación en el martillo y el clavo puede ser extraído. El momento de torsión no es nulo.

En la fig. 10.3(c), la línea de acción de la fuerza es perpendicular al eje del martillo. La distancia d_3 al punto de rotación es mayor que en el caso 10.3(b) y de aquí se deriva una diferencia notable: el clavo puede ser extraído con menos dificultad. La combinación fuerza-distancia produce un momento de torsión cuyo resultado es más efectivo que en el caso de la fig. 10.3(b).

A la distancia perpendicular que existe entre el punto donde se aplica la fuerza y el punto o eje de giro se le conoce como *brazo de la fuerza*. Lo denotaremos con la letra b .

El momento de torsión tiene, entonces, que ver con el módulo de una fuerza y la distancia perpendicular al centro de giro. Por definición, el momento de torsión se expresa mediante la relación:

$$\text{Momento de torsión} = \text{Fuerza} \cdot \text{Brazo} \quad (10.1)$$

Si el momento de torsión lo designamos con la letra griega τ (tau), la relación (10.1) podemos escribirla como:

$$\tau = F \cdot b \quad (10.2)$$

De la relación anterior podemos ver que, para una fuerza de magnitud determinada, F , el momento de torsión que produce rotación, es mayor cuanto más grande sea el brazo de la fuerza.

Es importante destacar que cuando un objeto rota bajo la acción de una fuerza, se puede producir un giro del mismo sentido (horario) o de sentido contrario (antihorario) al movimiento de rotación de las agujas de un reloj. Para identificar cada uno de estos casos se ha convenido en asignar signo positivo al sentido antihorario y signo negativo al sentido horario. Bajo esta convención, un *momento de torsión es positivo si produce un giro antihorario*,

y negativo si produce un giro horario.

En la fig. 10.4, Jorge y Edgar producen momentos de torsión positivo y negativo, respectivamente. Los valores de esos momentos son:

$$\tau_J = P_J \cdot b_J \qquad \tau_E = -P_E \cdot b_E \qquad (10.3)$$

Los momentos de una fuerza se expresan en unidades de newton • metro ($N \cdot m$), de acuerdo con la relación (10.2). Usualmente, esta unidad se escribe como Nm.

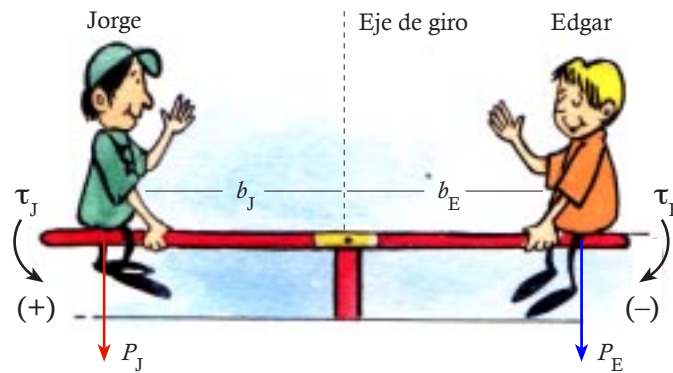


Fig. 10.4 Los momentos de torsión pueden ser positivos o negativos.

Ejemplo 10.1

En la fig. 10.4, Jorge y Edgar tienen masas de 40 kg y 30 kg, respectivamente. **a)** Si sus distancias al eje de giro son 2,3 y 2,7 m, determina el momento de torsión de cada uno. ¿Hacia donde gira el subibaja? **b)** Si Jorge se coloca a 2,3 m del eje de giro, ¿dónde debe colocarse Edgar para que su momento de torsión sea igual, en magnitud, al de Jorge?

Solución

a) De acuerdo a la definición de momento, tendremos:

$$\tau_J = P_J \cdot b_J = m_J \cdot g \cdot b_J = 40 \cdot 9,8 \cdot 2,3 \text{ Nm} = 901,6 \text{ Nm}$$

$$\tau_E = -P_E \cdot b_E = -m_E \cdot g \cdot b_E = -30 \cdot 9,8 \cdot 2,7 \text{ Nm} = -793,8 \text{ Nm}$$

Como el momento positivo es mayor que el negativo, el subibaja gira antihorario.

b) Del resultado anterior $\tau_J = 901,6 \text{ Nm}$. Este valor tiene que ser igual a la magnitud del momento de Edgar. Por tanto:

$$\tau_J = |\tau_E| \Rightarrow 901,6 \text{ Nm} = (30 \cdot 9,8 \text{ N}) \cdot d_E$$

Despejando d_E :

$$d_E = \frac{901,6 \text{ Nm}}{294 \text{ N}} = 3,07 \text{ m}$$

Es decir, si Edgar se coloca a 3,07 m del centro de giro, balancea el momento de torsión de Jorge y el subibaja no se mueve.



PIENSA Y EXPLICA



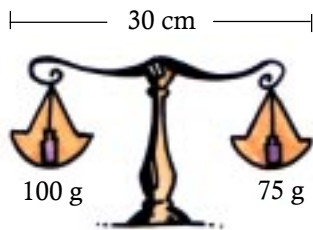
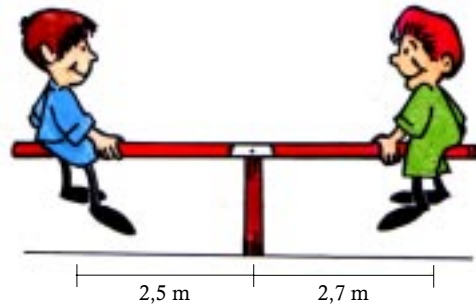
- 10.1** ¿Qué es el momento de torsión de una fuerza? Da ejemplos.
- 10.2** ¿Cómo se comparan los efectos de una fuerza y los de un momento de torsión ejercidos sobre un objeto?
- 10.3** ¿A qué se llama brazo de un momento de torsión?
- 10.4** ¿Bajo qué condiciones el momento de torsión sobre un objeto es nulo?
- 10.5** Escribe la fórmula de momento de torsión y di la unidad en la cual éste se expresa.
- 10.6** ¿Cómo se define un momento de torsión positivo? ¿Cómo se define un momento de torsión negativo?



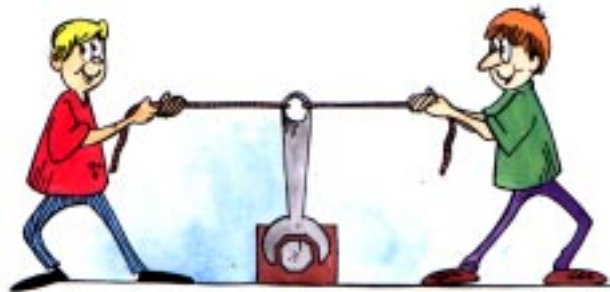
PROBLEMAS



- 10.1** En los platillos de la balanza de la fig. 10.5 se colocan masas de 100 g y 75 g. ¿Cuál es el momento de torsión de cada peso? ¿Hacia dónde se inclina la balanza?

**Fig. 10.5 Problema 10.1.****Fig. 10.6 Problema 10.2.**

- 10.2** Jesús y Alcides se montan en un subibaja, fig. 10.6, en lados opuestos y a cierta distancia del eje de rotación del mismo. Jesús tiene una masa de 35 kg y se sienta a 2,5 m del eje. Alcides se sienta a 2,7 m del eje de rotación y el subibaja permanece en equilibrio. ¿Cuánto pesa Alcides?
- 10.3** Luis y Alberto participan en un concurso para tratar de aflojar o apretar una tuerca, como se muestra en la fig. 10.7. Luis toma una cuerda de 1 m de longitud, la ata al extremo de la llave, usada para actuar sobre la tuerca y aplica una fuerza de 300 N. Alberto razona de la siguiente manera: "tomaré una cuerda del doble de longitud (2 m) y ganaré el concurso aplicando sólo una fuerza de 200 N". ¿Quién gana el concurso?

**Fig. 10.7 Problema 10.3.**

- 10.4** Una regla graduada de 50 cm de longitud, fig. 10.8, se cuelga, mediante ganchos, en su centro de masa. A una distancia de 10 cm se coloca una masa de 3 kg y mediante otra masa de 5 kg se trata de equilibrar el conjunto. ¿A qué distancia del extremo izquierdo de la regla debe colgarse esta última masa?
- 10.5** El pajarito de la figura 10.9 logra balancear la regla graduada. ¿Cuánto pesa la regla?

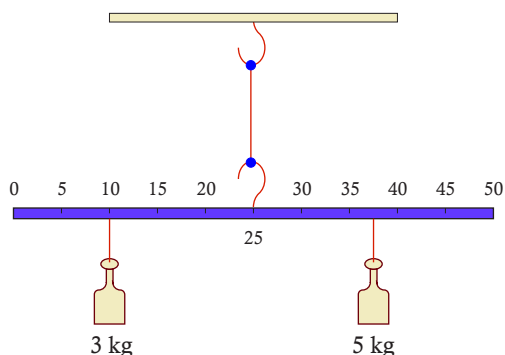


Fig. 10.8 Problema 10.4.

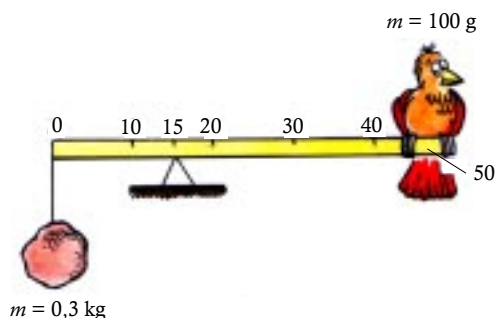


Fig. 10.9 Problema 10.5.

10.2 COMPOSICIÓN Y DESCOMPOSICIÓN DE FUERZAS

Componer dos o más fuerzas es determinar la fuerza neta o resultante de las mismas. La fuerza resultante es aquella que produce los mismos efectos de traslación y rotación que producen las fuerzas componentes que la originan. En esta sección consideramos cuerpos sometidos a la acción de fuerzas coplanares; es decir, que actúan en un mismo plano. Estudiaremos fuerzas que actúan en un solo punto de aplicación o en varios puntos de aplicación de un objeto.

10.2.1 Fuerzas que actúan en un punto común y tienen la misma dirección

Consideremos la roca de la fig. 10.10 sometida a la acción de las fuerzas $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$, con un punto de aplicación común A. Posiblemente, de acuerdo con la ubicación del punto A, se produzca un giro de la roca y luego ésta comience a desplazarse hacia la derecha. Puesto que tanto $\vec{F}_1$ como $\vec{F}_2$ tienen la misma dirección, el efecto resultante es el reforzamiento de las dos fuerzas para hacer desplazar la roca. La fuerza resultante es la suma vectorial de las fuerzas componentes y puede escribirse:

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \quad (10.4)$$

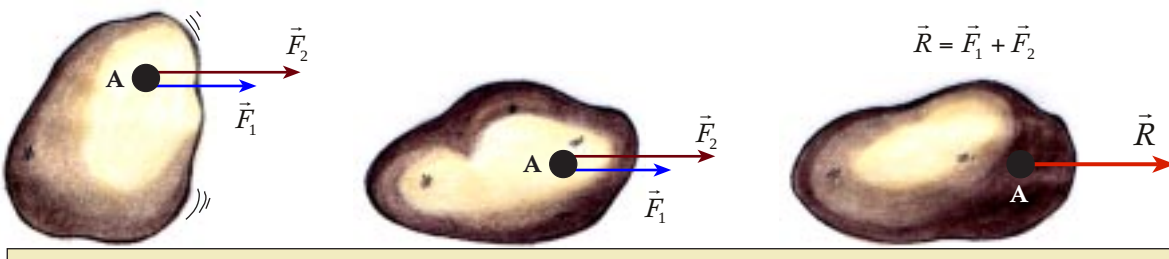


Fig. 10.10 Cuando dos fuerzas tienen el mismo punto de aplicación y la misma dirección, la fuerza resultante tiene mayor magnitud que las componentes.

En el caso de la fig 10.10, las dos fuerzas tienen la dirección positiva del eje de las X, por lo que su expresión vectorial es:

$$\vec{F}_1 = F_1 \vec{i} \quad \vec{F}_2 = F_2 \vec{i} \quad (10.5)$$

Donde F_1 y F_2 son los módulos de $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$ y el vector unitario $\vec{i}$ indica la dirección positiva según el eje X. Entonces:

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = F_1 \vec{i} + F_2 \vec{i} = (F_1 + F_2) \vec{i} \quad (10.6)$$

Esta última relación indica que la magnitud de la fuerza resultante es la suma de las magnitudes de las fuerzas componentes, $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$, y que su dirección es la del vector $\vec{i}$.

10.2.2 Fuerzas que actúan en un punto común y tienen direcciones opuestas

En la fig. 10.11, una roca es sometida a la acción de $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$, que actúan en el punto A y tienen direcciones contrarias.

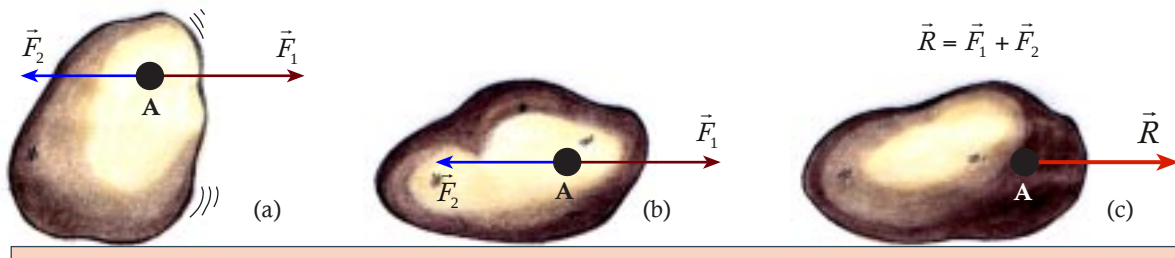


Fig. 10.11 Cuando dos fuerzas tienen el mismo punto de aplicación y direcciones opuestas, la fuerza resultante tiene menor magnitud que las componentes.

Como $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$ tienen direcciones opuestas, sus efectos se contrarrestan y la fuerza resultante se obtiene mediante la suma vectorial de las dos fuerzas. Si la fuerza $\vec{F}_1$ tiene mayor magnitud que $\vec{F}_2$, la roca se desplazaría hacia la derecha. Podemos escribir:

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \quad (10.7)$$

Como $\vec{F}_1 = F_1 \vec{i}$ y $\vec{F}_2 = -F_2 \vec{i}$, nos queda:

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = F_1 \vec{i} - F_2 \vec{i} = (F_1 - F_2) \vec{i} \quad (10.8)$$

Relación que indica que la fuerza resultante tiene la dirección del eje de las X y su magnitud es la diferencia entre las magnitudes de $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$.

10.2.3 Fuerzas con distintos puntos de aplicación y direcciones paralelas

En la fig. 10.12 se muestra esta situación, que puede tener, a su vez, dos versiones: fuer-

zas con igual dirección o con dirección contraria.

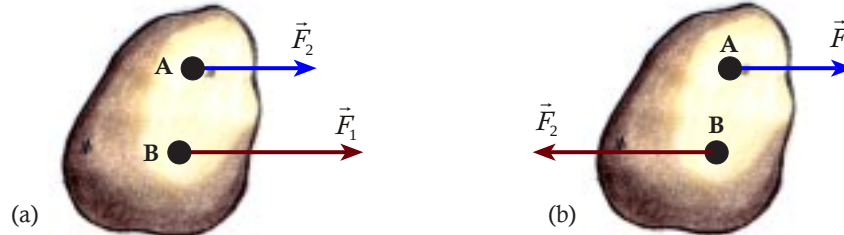


Fig. 10.12 Fuerzas paralelas con distintos puntos de aplicación: a) Con la misma dirección, b) Con direcciones contrarias.

Aun cuando las fuerzas $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$ pueden originar momentos de torsión que tienden a hacer girar la roca (esto lo estudiaremos en la próxima sección), desde el punto de vista de la fuerza resultante, la situación es similar a los casos anteriores estudiados. Esto es:

$$\text{Fig. 10.12(a):} \quad \vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = F_1\vec{i} + F_2\vec{i} = (F_1 + F_2)\vec{i}$$

$$\text{Fig. 10.12(b):} \quad \vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = F_1\vec{i} - F_2\vec{i} = (F_1 - F_2)\vec{i}$$

10.2.4 Fuerzas que forman un ángulo con la horizontal

Cuando las fuerzas aplicadas sobre un objeto no son horizontales o verticales, es siempre posible hacer una descomposición en términos de componentes en los ejes X y Y de dichas fuerzas. Un caso sencillo se presenta en la fig. 10.13. Una fuerza $\vec{F}$, que forma un ángulo α con la horizontal, se aplica en el punto A del objeto. El método de descomposición consiste en hacer pasar un par de ejes cartesianos por el punto de aplicación, en este caso el punto A. A partir del extremo de $\vec{F}$ se hacen proyecciones perpendiculares sobre los ejes X y Y. Esas proyecciones conforman las componentes perpendiculares del vector que representa a $\vec{F}$. La expresión vectorial para la fuerza $\vec{F}$ es:

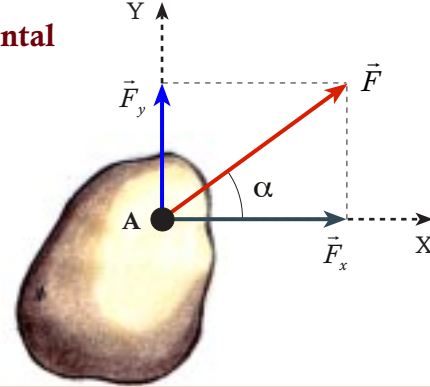


Fig. 10.13 Descomposición de una fuerza en sus componentes vertical y horizontal.

$$\vec{F} = F_x\vec{i} + F_y\vec{j} \quad (10.9)$$

La determinación precisa de F_x y F_y requiere del conocimiento tanto del módulo de $\vec{F}$ como del ángulo α . Sin embargo, es posible una solución gráfica, que permita obtener esas componentes de manera aproximada.

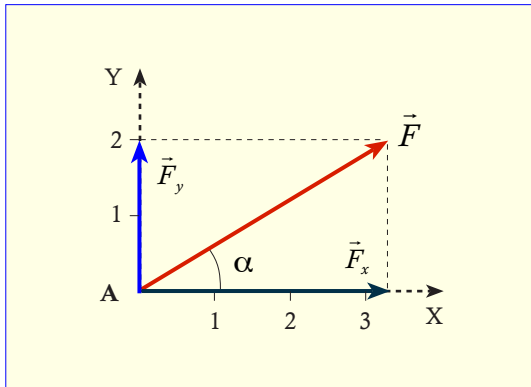


Fig. 10.14 Forma gráfica para obtener valores aproximados de las componentes F_x y F_y de una fuerza $\vec{F}$.

Considera la fig. 10.14. La fuerza $\vec{F}$ está dividida en cuatro segmentos, cada uno de los cuales puede representar, por ejemplo, 10 N. Entonces, $\vec{F}$ tiene una magnitud de 40 N y forma un ángulo α con el eje X. A partir del extremo de $\vec{F}$ hacemos proyecciones perpendiculares a los ejes X y Y. Así, se obtienen las componentes F_x y F_y , cuyas magnitudes, una vez medidas con aproximación, corresponden a los siguientes valores:

$$F_x : 3,3 \text{ cm}$$

$$F_y : 2 \text{ cm}$$

En término de unidades de fuerza (newtons), tendremos:

$$F_x = 33 \text{ N}$$

$$F_y = 20 \text{ N}$$

Entonces, $\vec{F}$ puede escribirse como:

$$\vec{F} = F_x \vec{i} + F_y \vec{j} = 33\vec{i} + 20\vec{j} \text{ N} \quad (10.10)$$

La idea desarrollada puede ser extendida a dos o más fuerzas ejercidas sobre un objeto, tanto si se trata de fuerzas aplicadas en un punto común como en distintos puntos. Lo notable del método consiste en que, de esta manera, podemos obtener la descomposición de las fuerzas en sus componentes horizontales y verticales, sumar éstas separadamente y, luego, obtener el vector que representa a la fuerza resultante. La idea se ilustra en la fig 10.15(a) y 10.15(b).

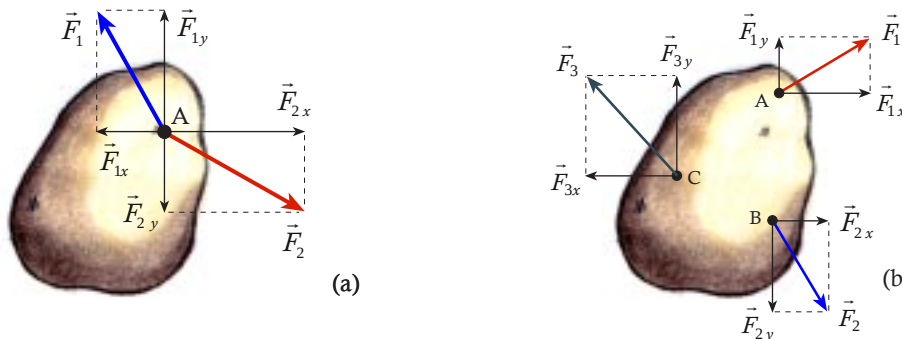


Fig. 10.15 Fuerzas con ángulo de inclinación actuando en: a) El mismo punto de aplicación. b) Distintos puntos de aplicación.

En la fig. 10.15(a) $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$ tienen el punto de aplicación común, A. La descomposición según los ejes X y Y arroja los siguientes resultados:

$$\vec{F}_1 = -F_{1x}\vec{i} + F_{1y}\vec{j} \quad \vec{F}_2 = F_{2x}\vec{i} - F_{2y}\vec{j} \quad (10.11)$$

Las resultantes según los ejes X y Y son:

$$\vec{R}_x = (-F_{1x} + F_{2x})\vec{i} \quad \vec{R}_y = (F_{1y} - F_{2y})\vec{j} \quad (10.12)$$

La fuerza resultante total es:

$$\vec{R} = \vec{R}_x + \vec{R}_y = (-F_{1x} + F_{2x})\vec{i} + (F_{1y} - F_{2y})\vec{j} \quad (10.13)$$

Para la fig. 10.15(b) tendremos:

$$\vec{F}_1 = F_{1x}\vec{i} + F_{1y}\vec{j} \quad \vec{F}_2 = F_{2x}\vec{i} - F_{2y}\vec{j} \quad \vec{F}_3 = -F_{3x}\vec{i} + F_{3y}\vec{j} \quad (10.14)$$

La fuerza resultante total es:

$$\vec{R} = (F_{1x} + F_{2x} - F_{3x})\vec{i} + (F_{1y} - F_{2y} + F_{3y})\vec{j} \quad (10.15)$$

Ejemplo 10.2

Los vendedores ambulantes de helados o “heladeros” son personas muy apreciadas por nuestros niños. Su trabajo es muy agotador. En la fig. 10.16 uno de ellos empuja un carrito de helados de masa 50 kg. El coeficiente dinámico de fricción entre las ruedas del carrito y el pavimento es $\mu_d = 0,85$. a) ¿Qué fuerza debe ejercer el heladero para mover el carrito a una velocidad constante? b) Si la fuerza aplicada por el heladero es de 600 N, ¿cuál es la aceleración del carrito de helados?

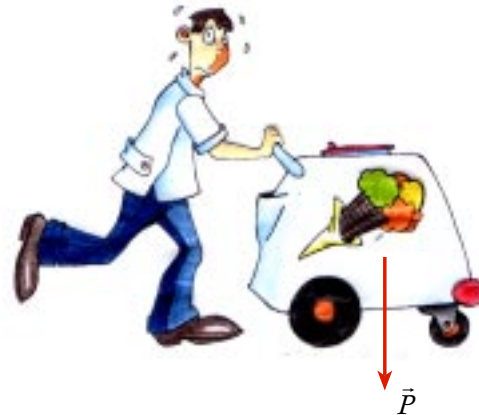


Fig. 10.16 Ejemplo 10.2.

Solución

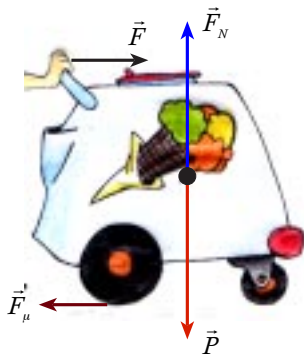


Fig. 10.17 Diagrama de fuerzas. Ejemplo 10.2.

a) En la fig. 10.17 se muestra el diagrama de fuerzas sobre el carrito. El peso, dirigido hacia abajo, es contrarrestado por la fuerza normal, $\vec{F}_N$, que se distribuye en las tres ruedas. La fuerza de rozamiento, opuesta al movimiento del carrito, se manifiesta en las tres ruedas y está dada por:

$$\vec{F}_\mu = -\mu_d P \vec{i} = -0,85 \cdot 9,8 \cdot 50 \vec{i} = -416,5 \vec{i} \text{ N}$$

La fuerza horizontal resultante es:

$$\vec{R} = \vec{F} + \vec{F}_\mu$$

Para que el carro se mueva a velocidad constante, la aceleración debe ser igual a cero por lo que la fuerza resultante, $\vec{R}$, debe ser también igual a cero. Sustituyendo el valor de $\vec{F}_\mu$:

$$\vec{F} + \vec{F}_\mu = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{F} = -\vec{F}_\mu = -(-416,5\vec{i}) \text{ N} = 416,5\vec{i} \text{ N}$$

b) Si la fuerza aplicada por el heladero es de 600 N, tendremos:

$$\vec{F} = 600\vec{i} \text{ N}$$

La fuerza resultante está dada por:

$$\vec{F}_R = \vec{F} + \vec{F}_\mu \quad \Rightarrow \quad \vec{F}_R = 600\vec{i} - 416,5\vec{i} = 183,5\vec{i} \text{ N}$$

Luego, la aceleración del carrito será:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_R}{m} \quad \Rightarrow \quad \vec{a} = \frac{183,5\vec{i}}{50} \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 3,67\vec{i} \text{ m/s}^2$$

Donde el vector $\vec{i}$ indica el movimiento del carrito hacia la derecha.

Ejemplo 10.3

En la fig. 10.18, un hombre empuja una caja de madera sobre un piso de cemento. El coeficiente dinámico de fricción entre la caja y el piso es 0,50. La caja tiene una masa de 50 kg y el hombre ejerce una fuerza de 400 N sobre la cuerda, que forma un ángulo de 30° con la horizontal. Determina las fuerzas vertical y horizontal resultantes y la aceleración de la caja. Tomar $g = 10 \text{ m/s}^2$.

Solución

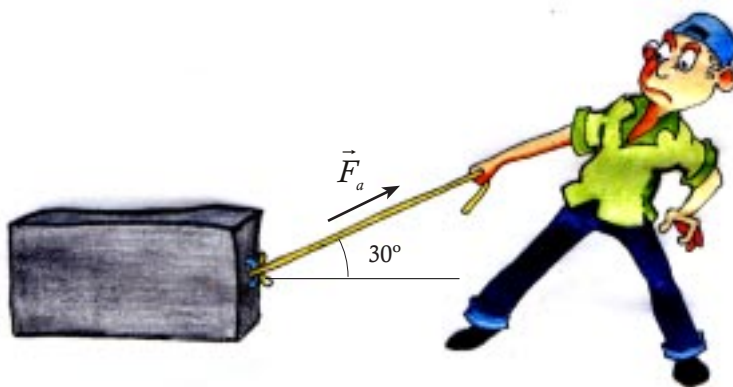


Fig. 10.18 Ejemplo 10.3.

En la fig. 10.19 se muestra el diagrama de fuerzas sobre la caja de madera. La fuerza aplicada por el hombre, $\vec{F}_a$, está representada por un vector de 4 cm, que forma un ángulo de 30° con la horizontal. Cada cm corresponde a 100 newtons. La proyección horizontal origina un vector, $\vec{F}_{ax}$, de longitud aproximadamente igual a 3,5 cm, que representa una magnitud de 350 N. Similarmente, la proyección vertical da lugar a un vector $\vec{F}_{ay}$ de longitud igual a 2 cm que corresponde a una magnitud de 200 N. De acuerdo a lo anterior, podemos expresar:

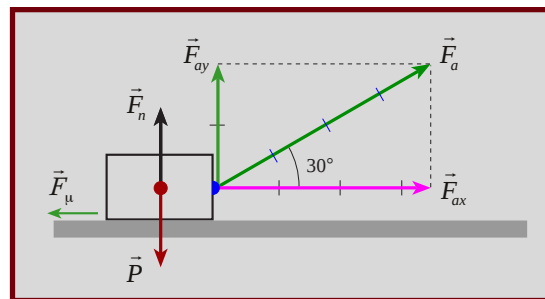


Fig. 10.19 Diagrama de fuerzas para el ejemplo 10.3.

$$\vec{F}_a = \vec{F}_{ax} + \vec{F}_{ay} \Rightarrow \vec{F}_a = F_{ax}\vec{i} + F_{ay}\vec{j} \Rightarrow \vec{F}_a = 350\vec{i} + 200\vec{j}$$

Donde:

$$\vec{F}_{ax} = 350\vec{i} \quad \vec{F}_{ay} = 200\vec{j}$$

El peso $\vec{P}$ de la caja está dado por:

$$\vec{P} = -mg\vec{j} = -50 \cdot 10\vec{j} = -500\vec{j}$$

Como la caja no se desplaza verticalmente, la resultante de las fuerzas según el eje Y es igual a cero y puede escribirse:

$$\vec{R}_y = \vec{F}_{ay} + \vec{P} + \vec{F}_N = 0$$

Donde $\vec{F}_N$ es la fuerza normal a la superficie entre la caja y el piso de cemento. Despejando $\vec{F}_N$ de la relación anterior:

$$\vec{F}_N = -\vec{F}_{ay} - \vec{P} \Rightarrow \vec{F}_N = -200\vec{j} - (-500\vec{j}) = -200\vec{j} + 500\vec{j} = 300\vec{j} \text{ N}$$

Es decir, la fuerza normal tiene la dirección del eje Y (positiva). Hay que observar que, en este caso, la magnitud de la fuerza normal no es igual a la magnitud del peso por la contribución F_{ay} de la fuerza aplicada. La fuerza de roce, que se opone al movimiento, puede obtenerse de la fórmula:

$$\vec{F}_\mu = -\mu_d F_N \vec{i} \Rightarrow \vec{F}_\mu = -0,50 \cdot 300\vec{i} \Rightarrow \vec{F}_\mu = -150\vec{i} \text{ N}$$

La fuerza resultante según el eje X es:

$$\vec{F}_{ax} + \vec{F}_\mu = 350\vec{i} - 150\vec{i} \Rightarrow \vec{R}_x = 200\vec{i} \text{ N}$$

Esta fuerza produce una aceleración dada por:

$$\vec{a} = \frac{\vec{R}_x}{m} = \frac{200\vec{i} \text{ N}}{50 \text{ kg}} \Rightarrow \vec{a} = 4 \text{ m/s}^2$$



PIENSA Y EXPLICA



- 10.7** ¿Cuál es el concepto de composición de fuerzas?
- 10.8** ¿Qué son fuerzas coplanares?
- 10.9** ¿Por qué dos fuerzas con el mismo punto de aplicación, pero con direcciones iguales o contrarias, pueden tener una resultante que se expresa de igual forma: $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$?
- 10.10** ¿Cuál es el concepto de descomposición de fuerzas?
- 10.11** Describe el método gráfico utilizado para descomponer dos fuerzas, según los ejes X y Y.
- 10.12** Cita algunos casos de fuerzas no coplanares.



PROBLEMAS



- 10.6** Elio y Juan aplican fuerzas de magnitud de 250 N y 400 N, respectivamente, al árbol de la fig. 10.20. Determina la expresión vectorial de la fuerza resultante. ¿Cuál es su módulo y dirección?



Fig. 10.20 Problema 10.6.

- 10.7** Para mover un terroncito de azúcar, las hormigas de la figura 10.21 usan fuerzas de $0,02 \text{ N}$ en la misma dirección. Calcula la fuerza resultante en ambos casos y establece cuál ubicación de las hormigas es más eficiente para efectuar el traslado del terroncito.



Fig. 10.21 Problema 10.7.

- 10.8** Una plataforma de madera, utilizada para pintar paredes, tiene una masa de 30 kg y cuelga de una viga de hierro mediante cuerdas (fig. 10.22). La plataforma mide 3 m . Un pintor de 70 kg se coloca a 1 m de uno de sus extremos. a) Determina cuál es la suma de las fuerzas sobre las cuerdas que unen a la plataforma con la viga. b) ¿Cómo varía esta suma si el pintor se mueve sobre la plataforma?

- 10.9** La carretilla de la figura 10.23 está cargada con 30 kg . Si el hombre, al levantarla, ejerce una fuerza de 100 N , ¿qué fuerza ejerce el piso sobre la rueda? La carretilla tiene una masa de 12 kg .



Fig. 10.22 Problema 10.8.



Fig. 10.23 Problema 10.9.

- 10.10** Si el coeficiente dinámico de fricción entre la neda y el piso de la carretilla del problema 10.9 es $\mu_d = 0,80$, **a)** ¿Qué fuerza debe ejercer el hombre para moverla a velocidad constante? **b)** Si el hombre aplica una fuerza horizontal de 150 N, ¿qué aceleración adquiere la carretilla?

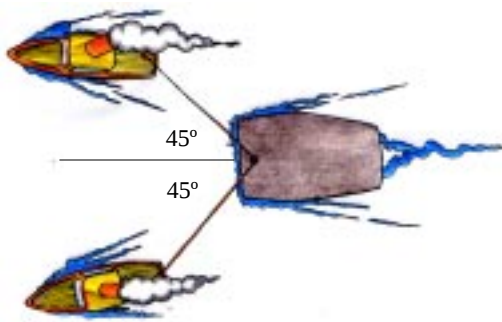


Fig. 10.24 Problema 10.11.

- 10.11** En la figura 10.24, dos lanchas remolcan una gabarra en el mar a velocidad constante. La fuerza ejercida por cada lancha sobre las cuerdas es de 2.830 N representadas por vectores que tienen una longitud de 2,83 cm. ¿Cuál es la magnitud y dirección de la fuerza ejercida por el agua sobre la gabarra?

10.3 EQUILIBRIO MECÁNICO

Es una idea común, en nuestra vida cotidiana, considerar que un objeto está en equilibrio cuando no se mueve. En Física, esta idea se extiende a cuerpos que se trasladen o roten con movimiento uniforme. Bajo estas condiciones, se establece, entonces, lo siguiente:

Un objeto rígido está en equilibrio mecánico cuando permanece estático, se traslada linealmente con velocidad uniforme o rota con velocidad angular constante (recorre ángulos iguales en tiempos iguales).

La anterior definición contiene tres aspectos a analizar. Cuando un cuerpo rígido no se mueve; es decir, permanece estático, la fuerza neta o resultante sobre el mismo es igual a cero. Se dice, entonces, que el objeto está en un *estado de equilibrio estático*. Un cuadro que cuelga en una pared o un computador que descansa sobre un escritorio son ejemplos de equilibrio estático (fig. 10.25).

En el caso del cuadro que cuelga, su peso es equilibrado por las fuerzas ejercidas por las cuerdas que lo soportan. De igual manera, el peso del equipo de computación es contrarrestado por la fuerza que ejerce la mesa sobre el mismo. En ambos casos, los cuerpos ni se trasladan ni rotan.

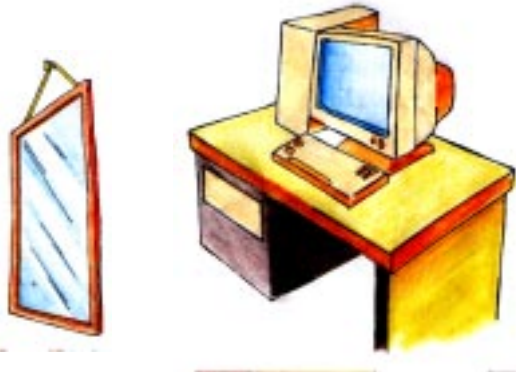


Fig. 10.25 Un cuadro que cuelga de una pared y un computador que yace sobre un escritorio son ejemplos de equilibrio estático.

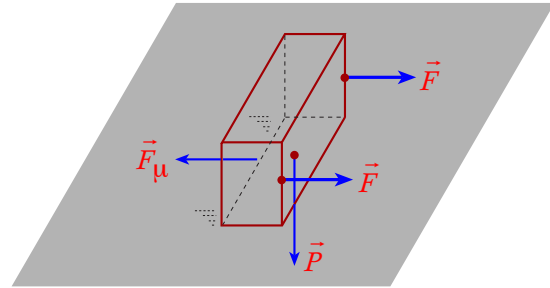


Fig. 10.26 Si las fuerzas aplicadas balancean a la fuerza de fricción, el bloque se moverá con velocidad constante y se encontrará en equilibrio traslacional.

En el caso de un objeto en movimiento de traslación, se pueden presentar dos situaciones distintas. Si la fuerza resultante no es igual a cero el objeto acelera de acuerdo a la segunda ley de Newton ($a = F_R / m$). Si, por el contrario, la fuerza resultante es nula, el objeto se mueve con velocidad constante y se dice que se encuentra en *equilibrio traslacional*. Así, si en la fig. 10.26 se aplican dos fuerzas $\vec{F}$ de igual magnitud y dirección al bloque del dibujo, de manera que dichas fuerzas balancean a la fuerza de fricción, $\vec{F}_\mu$, el bloque se moverá a velocidad constante, ya que la fuerza resultante es nula:

$$\vec{F}_R = \vec{F} + \vec{F} + \vec{F}_\mu = 0$$

Al resultar $\vec{F}_R = 0$, la aceleración del bloque es también igual a cero y, por tanto, el movimiento traslacional es uniforme.

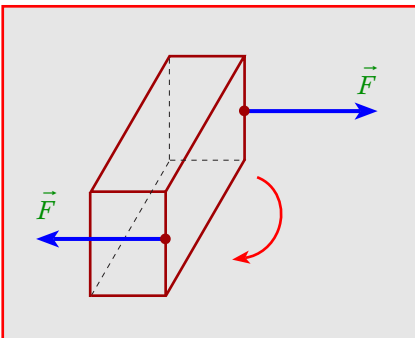


Fig. 10.27 Cuando se aplican fuerzas iguales y opuestas a un objeto, éste tiende a girar.

Una tercera condición se presenta en la fig 10.27. En este caso, la suma vectorial de las fuerzas horizontales es igual a cero; sin embargo, por tratarse de fuerzas de igual magnitud y opuestas sistema al que usualmente se le denomina *par de fuerzas*, el cuerpo tiende a rotar. Esto indica que la condición $\vec{F}_R = 0$ no garantiza que el objeto no se mueva. Si al girar, lo hace con velocidad constante, se dice que el cuerpo se encuentra en *equilibrio rotacional*. Para que esta tercera condición se cumpla, es necesario que la suma algebraica de los momentos de torsión de las fuerzas que actúan sobre un objeto sea igual a cero.

Entonces, para que un cuerpo rígido esté en *equilibrio mecánico*, se deben cumplir las siguientes condiciones:

1. La fuerza resultante sobre el objeto debe ser nula. Esto se expresa, matemáticamente, de la siguiente manera:

$$\vec{F}_R = \sum \vec{F} = 0 \quad (10.16)$$

2. La suma algebraica de los momentos de torsión de las fuerzas aplicadas debe ser nula:

$$\sum \tau = 0 \quad (10.17)$$

Ejemplo 10.4

El móvil de la fig. 10.28 está equilibrado. Cada una de las mariposas es una pieza de cerámica de masa 200 g. Los pesos de las cuerdas y los soportes transversales son insignificantes. **a)** Determina el peso que soportan las cuerdas y el techo. **b)** ¿Cuáles son los valores de las distancias x , y , z para que se mantenga el equilibrio? Toma el valor de la aceleración de gravedad como $g = 10 \text{ m/s}^2$.

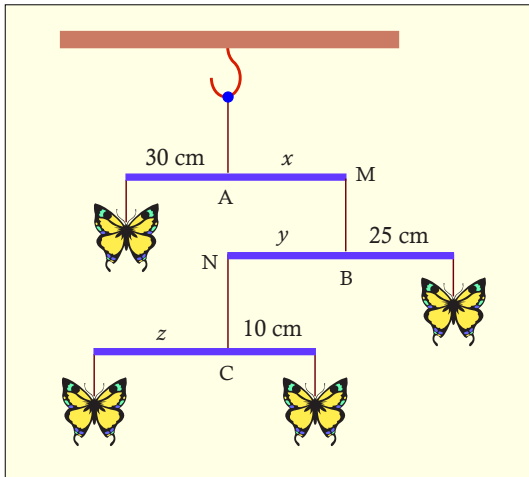


Fig. 10.28 Ejemplo 10.4.

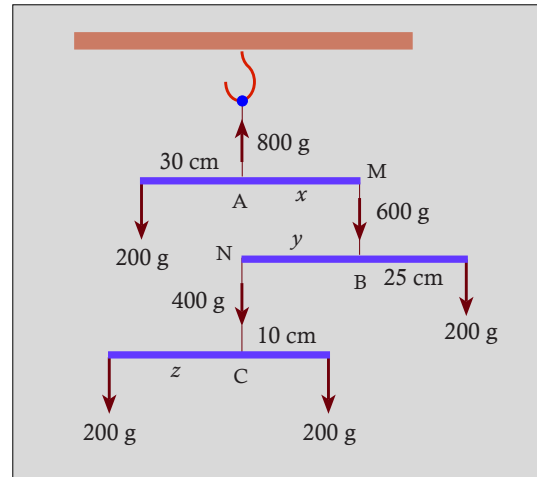


Fig. 10.29 Distribución de las masas para el ejemplo 10.6.

Solución

a) En la fig. 10.29 se detallan las masas que actúan sobre cada una de las cuerdas:

Cuerda NC: $\text{masa} = (200 + 200) \text{ g} = 400 \text{ g}$

$$\text{Peso} = 0,4 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 4 \text{ N}$$

Cuerda MB: $\text{masa} = (400 + 200) \text{ g} = 600 \text{ g}$

$$\text{Peso} = 0,6 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 6 \text{ N}$$

Cuerda del techo: $\text{masa} = (200 + 600) \text{ g} = 800 \text{ g}$

$$\text{Peso total} = 0,8 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 10 \text{ N}$$

b) Para que se mantenga el equilibrio, es necesario que todos los soportes transversales estén balanceados, lo cual supone que la suma algebraica de los momentos de torsión para cada soporte sea igual a cero. Tomaremos estos momentos con respecto a los puntos de unión con las cuerdas, recordando que los momentos son positivos cuando producen rotación, en sentido contrario del movimiento de las agujas del reloj y negativos cuando producen rotación en el sentido del movimiento de las agujas del reloj. Tenemos, entonces:

Soporte inferior:

$$+200 \cdot z - 200 \cdot 10 = 0 \quad \Rightarrow \quad z = \frac{200 \cdot 10}{200} = 10 \text{ cm}$$

Soporte intermedio:

$$+400 \cdot y - 200 \cdot 25 = 0 \quad \Rightarrow \quad y = \frac{200 \cdot 25}{400} = 12,5 \text{ cm}$$

Soporte superior:

$$-600 \cdot x + 200 \cdot 30 = 0 \quad \Rightarrow \quad x = \frac{200 \cdot 30}{600} = 10 \text{ cm}$$

Los anteriores resultados indican a qué distancia de los puntos CB y A, respectivamente, deben colocarse las mariposas para mantener equilibrado el móvil. Observa que en los cálculos anteriores usamos los valores de las masas en lugar de los pesos (¿Por qué esto es válido?).

Ejemplo 10.5

Elena y Luis, de masas 30 kg y 40 kg respectivamente, se cuelgan de una barra rígida de masa 70 kg. La barra está anclada a una pared mediante pernos que le impiden moverse. Como se indica en la fig 10.30, Elena está a 1 m de la pared, mientras que Luis cuelga al extremo de la barra. a) ¿Cuál es la fuerza que soportan los pernos en el anclaje A? b) ¿Cuáles son la magnitud y el punto de aplicación de la fuerza resultante correspondientes a Elena, Luis y la barra? Toma $g = 10 \text{ m/s}^2$.

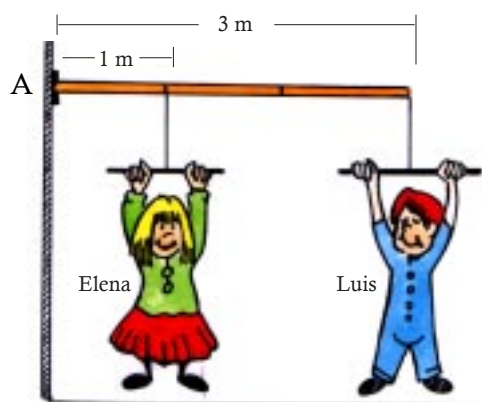


Fig. 10.30 Ejemplo 10.5.

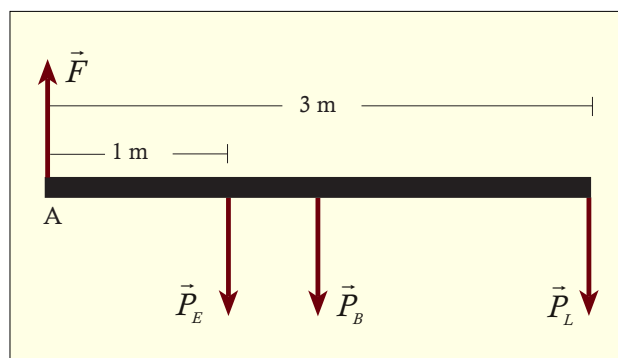


Fig. 10.31 Fuerzas que actúan sobre la viga de la fig. 10.30.

Solución

a) En la fig. 10.31 se muestran las fuerzas que actúan sobre la barra:

$$\text{Peso de Elena: } P_E = m_E \cdot g = 30 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 300 \text{ N}$$

$$\text{Peso de Luis: } P_L = m_L \cdot g = 40 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 400 \text{ N}$$

$$\text{Peso de barra: } P_B = m_B \cdot g = 70 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 700 \text{ N}$$

$\vec{F}$: fuerza que soportan los pernos en el punto de apoyo de la barra.

Como la barra está en equilibrio, la suma vectorial de las fuerzas aplicadas a la misma es igual a cero. Es decir, la resultante de estas fuerzas es nula:

$$\vec{F}_R = \vec{P}_E + \vec{P}_B + \vec{P}_L + \vec{F} = 0$$

Las fuerzas aplicadas pueden ser expresadas como:

$$\vec{P}_E = -300\vec{j} \quad \vec{P}_B = -700\vec{j} \quad \vec{P}_L = -400\vec{j}$$

Sustituyendo en la relación anterior:

$$-300\vec{j} - 700\vec{j} - 400\vec{j} + \vec{F} = 0$$

El valor de $\vec{F}$ es:

$$\vec{F} = 300\vec{j} + 700\vec{j} + 400\vec{j} = 1.400\vec{j} \text{ N}$$

Lo que indica que los pernos soportan una fuerza de 1.400 N, dirigida hacia arriba.

b) La fuerza resultante, correspondiente a las fuerzas aplicadas es igual a la suma vectorial de las mismas:

$$\vec{F}_R = \vec{P}_E + \vec{P}_B + \vec{P}_L = -300\vec{j} - 700\vec{j} - 400\vec{j} = -1.400\vec{j} \text{ N}$$

Para determinar el punto de aplicación de la fuerza resultante, se parte del siguiente argumento: la resultante debe producir el mismo momento de torsión que producen las fuerzas aplicadas, puesto que la misma representa al conjunto de ellas. Llamaremos x a la distancia entre el soporte de la barra y la fuerza resultante (ver fig. 10.32). Esta distancia es seleccionada arbitrariamente, pero debe usarse el sentido común para ubicarla adecuadamente. En este caso, debe estar ubicada más hacia el extremo derecho, por estar la mayor parte de las fuerzas aplicadas hacia ese extremo. Al punto A del extremo de la barra podemos tomarlo como eje de rotación.

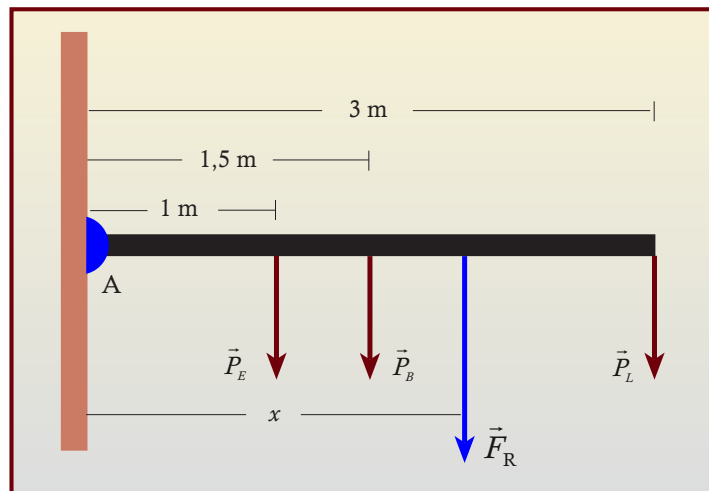


Fig. 10.32 Diagrama de fuerzas para la determinación de la resultante y de su punto de aplicación. Ejemplo 10.5.

De acuerdo a lo anterior, los momentos con respecto al punto A son:

$$\tau_E = -300 \cdot 1 \text{ Nm} = -300 \text{ Nm} \quad \tau_B = -700 \cdot 1,5 \text{ Nm} = -1.050 \text{ Nm}$$

$$\tau_L = -400 \cdot 3 \text{ Nm} = -1.200 \text{ Nm}$$

La suma de estos momentos es igual al momento de la fuerza resultante:

$$\tau_R = \tau_E + \tau_B + \tau_L = -300 - 1.050 - 1.200 = -2.550 \text{ Nm}$$

Como $\tau_R = -F_R \cdot x$, tendremos:

$$-F_R \cdot x = -2.250 \text{ Nm} \quad \Rightarrow \quad x = \frac{-2.250 \text{ Nm}}{-1.400 \text{ N}} = 1,61 \text{ m}$$

Este resultado indica que si las fuerzas presentes fuesen sustituidas por una fuerza resultante, $\vec{F}_R$, ésta debe aplicarse a 1,61 m del soporte de la barra.



PIENSA Y EXPLICA



10.13 Define equilibrio mecánico para un objeto rígido.

10.14 ¿Qué es equilibrio estático? ¿Qué es equilibrio traslacional? ¿Qué es equilibrio rotacional?

10.15 ¿Qué es un par de fuerzas?

10.16 ¿Qué condiciones se deben cumplir para que un objeto rígido se encuentre en equilibrio mecánico?



PROBLEMAS



- 10.12** Uno de los niños de la figura 10.33, de masa 40 kg se sienta a 1,8 m del punto de soporte del subibaja. El otro tiene una masa de 30 kg) ¿Qué fuerza ejerce el pivote sobre la tabla del subibaja? b) ¿Dónde debe colocarse el otro niño, para mantener el equilibrio? La tabla pesa 100 N.
- 10.13** La regla graduada de la fig. 10.34 tiene una masa de 120 g. Al lado derecho del pivote se cuelgan pesos de 80 y 50 g. a) ¿A qué distancia debe colocarse una masa de 100 g para balancear el sistema? b) Bajo esta condición de equilibrio, ¿qué fuerza ejerce el pivote sobre la regla?

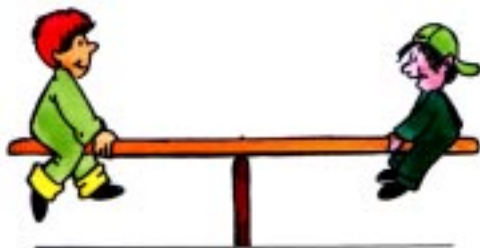


Fig. 10.33 Problema 10.12

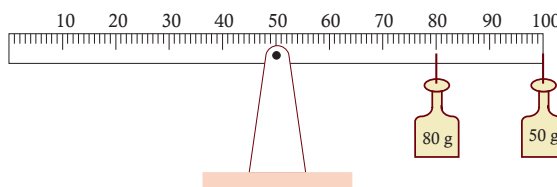


Fig. 10.34 Problema 10.13

- 10.14** La distancia entre los ejes del camión de la fig. 10.35 es de 3,20 m. El camión está detenido y en equilibrio. Las fuerzas sobre cada una de las ruedas delanteras es de 3.500 N y sobre las traseras es de 5.000 N. Determina dónde queda el CG del camión.
- 10.15** En uno de los extremos de la viga horizontal de 3 m y masa 40 kg de la fig. 10.36 se coloca una masa de 100 kg. ¿A qué distancia del CG de la viga debe colocarse la columna para que el sistema esté equilibrado?

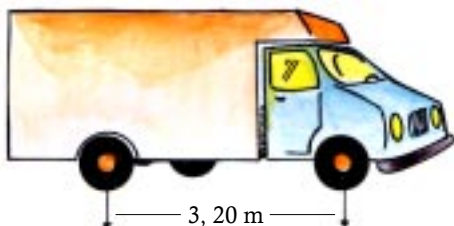


Fig. 10.35 Problema 10.14.

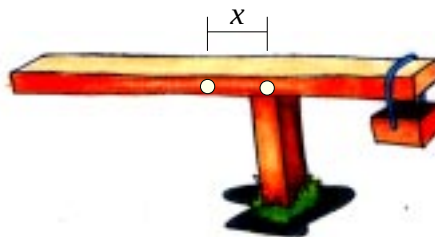


Fig. 10.36 Problema 10.15.

10.16 Sergio y Víctor trasladan un balde de agua mediante una barra de 3 m (Fig. 10.37). ¿Dónde debe colocarse el balde para que Sergio soporte el doble del peso que soporta Víctor?

10.17 El pintor de 68 kg (fig 10.38) camina sobre una tabla de 20 kg colocada simétricamente alrededor del soporte de un andamio. ¿Qué momento ejerce cuando está colocado a 1 m a la derecha del centro de la tabla?



Fig. 10.37 Problema 10.16.



Fig. 10.38 Problema 10.17.

10.4 ESTADOS DE EQUILIBRIO

En un estado de equilibrio todas las fuerzas y los momentos de torsión sobre un objeto están balanceados, de manera que dicho objeto o no se mueve (equilibrio estático) o se mueve con velocidad constante (equilibrio dinámico). Sin embargo dentro de los estados de equilibrio de un objeto no todos presentan las mismas características cuando se someten a factores de perturbación. Los eventos que tienen lugar, después que el objeto es perturbado, determinan la estabilidad del mismo. En general, podemos distinguir tres estados de equilibrio:

- Equilibrio estable
- Equilibrio inestable
- Equilibrio neutro o indiferente

Equilibrio Estable

Un objeto presenta un estado de equilibrio estable cuando vuelve por sí mismo a su configuración original, luego de ser perturbado. La condición de equilibrio estable hace que el objeto se resista a cambios en su posición espacial. En la fig. 10.39 se muestran

ejemplos de objetos en estado de equilibrio estable . Tanto el crucifijo como el matero cuelgan por debajo de un punto de suspensión y vuelven a su posición de equilibrio cuando son sometidos momentáneamente a la acción de una fuerza. Asimismo el cocotero vuelve a su posición de equilibrio , una vez que cesa el viento que lo hace oscilar . Cuando el resorte se comprime y se suelta, la bola sube y baja varias veces para luego alcanzar su estado inicial de equilibrio.

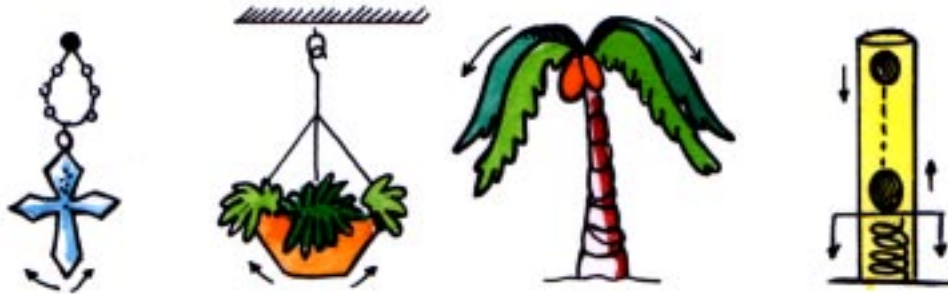


Fig. 10.39 Ejemplos de equilibrio estable.

Equilibrio Inestable

Un objeto presenta un estado de equilibrio inestable cuando no regresa a su posición inicial, al ser sometido a una fuerza perturbadora. El equilibrio inestable induce cambios en la posición espacial de un objeto. En la fig. 10.40 se muestran ejemplos de objetos con condición de equilibrio inestable.

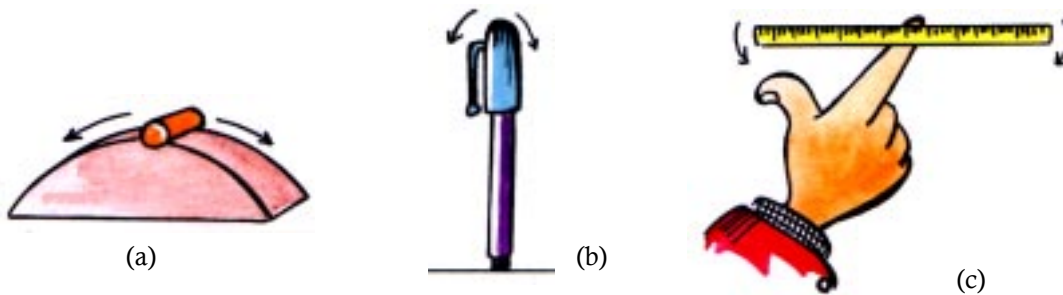


Fig. 10.40 Ejemplos de equilibrio inestable.

El rodillo de la fig. 10.40(a) puede descender en cualquier dirección de las mostradas al sufrir un pequeño desplazamiento. Una vez que inicia el descenso , ya no vuelve a su posición inicial en forma natural. Simultáneamente, el lapicero de la fig 10.40(b), apoyado sobre uno de sus extremos, puede ser sacado de su estado de equilibrio con una perturbación pequeña. El lapicero no volverá, por si mismo, a su posición original. En el caso de la fig. 10.40(c) la regla, apoyada en el dedo, puede abandonar su posición fácilmente cuando se somete a una perturbación en su estado de equilibrio original.

Equilibrio Neutro o Indiferente

Un objeto presenta un estado de equilibrio neutro o indiferente cuando el mismo establece una nueva condición de equilibrio, al someterse a una acción perturbadora. La fig. 10.41 muestra ejemplos de esta condición de equilibrio. Tanto el lápiz y la bola al rodar como la rueda al girar, alcanzan nuevas condiciones de equilibrio.

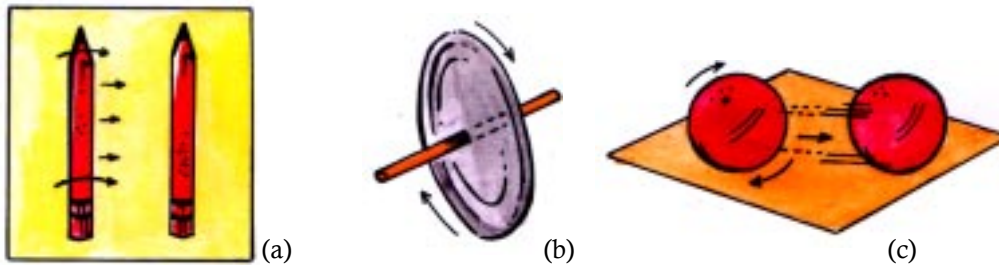


Fig. 10.41 Ejemplos de equilibrio neutro o indiferente.

10.5 ESTABILIDAD

El concepto de estabilidad en sistemas mecánicos está íntimamente relacionado con las condiciones de equilibrio y el centro de gravedad (o centro de masa) de los mismos.

Estabilidad es la capacidad que tiene un objeto para recobrar su estado de equilibrio, al ser sometido a una perturbación que lo hace cambiar su condición original.

Veamos cómo podemos relacionar el equilibrio de un objeto con la ubicación de su centro de gravedad. La fig. 10.42 muestra un trompo de juguete en tres posiciones. Cuando el trompo está en la posición de equilibrio inestable, fig. 10.42(a), cualquier desplazamiento pequeño lo hace perder su estado inicial y el centro de gravedad desciende en relación con el suelo. Si el trompo descansa sobre la base opuesta a la punta, fig. 10.42(b), tiene mayor estabilidad y, al ser perturbado mediante el desplazamiento indicado, trata de volver a su estado de equilibrio inicial y el centro de gravedad sube con respecto al suelo. Finalmente, si el trompo descansa sobre su costado fig. 10.42(c), cualquier desplazamiento no produce elevación o descenso de su centro de gravedad con respecto al suelo.

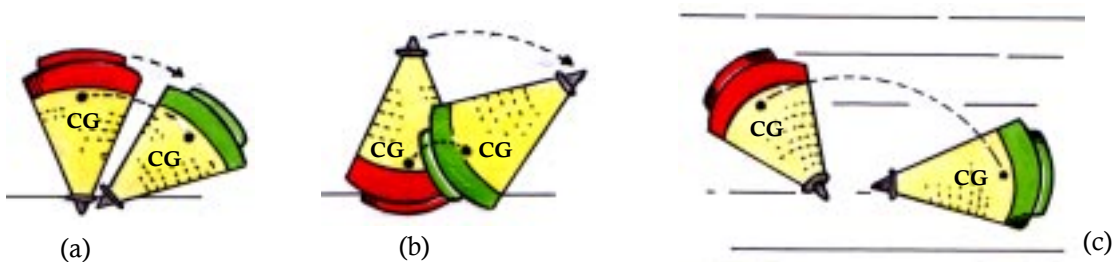


Fig. 10.42 Relación entre el desplazamiento del centro de gravedad y el estado de equilibrio de un objeto.

En general, puede afirmarse que si un objeto está balanceado, se cumple lo siguiente:

- Si un desplazamiento hace descender su centro de gravedad, el objeto presenta un estado de equilibrio inestable.
- Si un desplazamiento hace subir su centro de gravedad, el objeto presenta un estado de equilibrio estable.
- Si un desplazamiento ni sube ni baja el centro de gravedad, el objeto presenta un estado de equilibrio neutro.

La estabilidad de un objeto depende, básicamente, de tres aspectos:

a. La base de sustentación del objeto: la base de sustentación de un objeto apoyado corresponde a la superficie con la cual se apoya. A medida que esta base aumenta, es mayor la estabilidad del objeto. El libro de la fig. 10.43(a) es menos estable que el de la fig. 10.43(b), ya que, en el primer caso, la base de sustentación tiene una menor superficie.



Fig. 10.43 Si la base de sustentación es mayor, mejora la estabilidad.

b. Posición del centro de gravedad: mientras más bajo esté el centro de gravedad, más estable será el objeto. Así, el camión de la fig. 10.44(b) es más estable que el de la fig. 10.44(a). Similarmente, el porfiado de la fig. 10.44(d) es más estable que el de la fig. 10.44(c), ya que al aumentar la cantidad de líquido en la parte inferior del recipiente, el centro de gravedad se sitúa en un nivel más bajo.

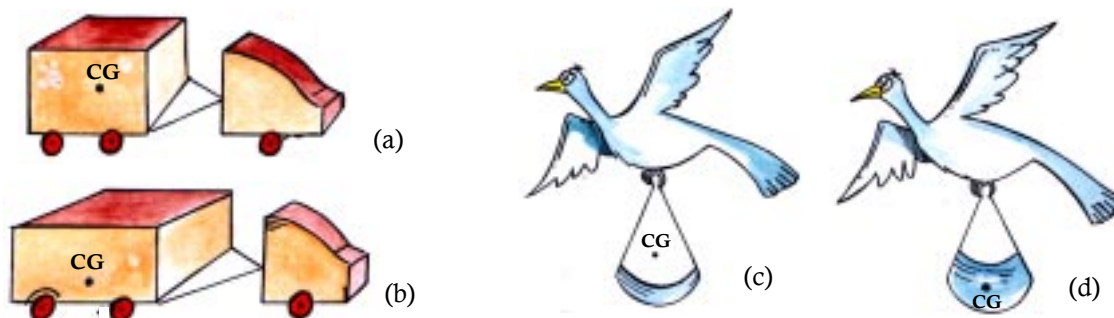


Fig. 10.44 La estabilidad de un objeto depende de la ubicación de su centro de gravedad.

c. Peso del objeto: a medida que aumenta el peso de un objeto, se incrementa su estabilidad. Entonces, un camión cargado de sacos de cemento es más estable que un camión, de las mismas características, cargado de anime. De la misma manera, el porfiado de la fig. 10.44(d) es más pesado y, por lo tanto, más estable que el de la fig. 10.44(c).

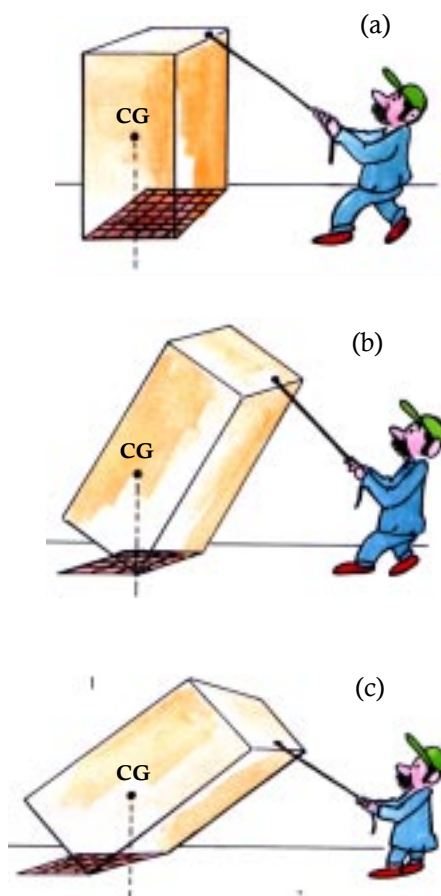
10.6 VOLCAMIENTO

Cuando un objeto apoyado es perturbado por un desplazamiento, es posible, bajo cierta condición, que se produzca el volcamiento del mismo. Esa condición es la siguiente:

Si la línea de acción del peso del cuerpo (la cual pasa por el centro de gravedad) atraviesa la base de sustentación del mismo, el cuerpo permanece en equilibrio; de lo contrario, volcará.

En la fig. 10.45 la base de sustentación corresponde al área rayada. El volcamiento sólo se produce en el caso (c), donde la vertical bajada desde el centro de gravedad no pasa por la base de sustentación. El momento de torsión de la fuerza aplicada por el hombre alrededor de una de las aristas del bloque, produce el giro que lo hace volcar.

Fig. 10.45 El volcamiento se produce cuando la vertical bajada desde el CG no pasa por la base de sustentación.



PIENSA Y EXPLICA



10.17 Define equilibrio estable. Cita ejemplos.

10.18 Define equilibrio inestable. Cita ejemplos.

10.19 Define equilibrio neutro o indiferente. Cita ejemplos.

- 10.20** Define estabilidad.
- 10.21** ¿Qué relación hay entre estabilidad y equilibrio?
- 10.22** ¿Cómo se desplaza el CG en los tres casos de equilibrio, cuando se produce una perturbación?
- 10.23** ¿De qué depende la mayor o menor estabilidad de un objeto?
- 10.24** ¿Has escuchado hablar de la torre de Pisa? ¿Por qué es tan famoso ese monumento?
- 10.25** ¿Por qué crees que es importante que un edificio alto tenga una base de sustentación profunda?
- 10.26** ¿Se mueve el CG de una persona cuando se inclina hacia delante? ¿Varía su base de sustentación? ¿Mejora o empeora su estabilidad?
- 10.27** Cuando se aumenta la cantidad de agua en un vaso, ¿qué sucede con el CG? ¿Qué pasa con la estabilidad?
- 10.28** ¿Qué efecto tiene sobre la estabilidad el rabo de los animales?
- 10.29** ¿Cuál es la base de sustentación de la silla en la figura 10.46? ¿Cuál es la base de sustentación si se le quita una pata a la silla?
- 10.30** ¿Por qué la persona de la fig. 10.47, que carga un balde de agua con su mano izquierda, tiene la tendencia a levantar la mano derecha?
- 10.31** ¿Qué condición debe cumplirse para que se produzca el volcamiento de un objeto?



Fig. 10.46 Piensa y Explica 10.29.



Fig. 10.47 Piensa y Explica 10.30.

CAPÍTULO 11



Trabajo y Energía

Aun cuando los términos trabajo y energía son usados frecuentemente en la vida diaria, en Física esos conceptos se definen en una forma más restringida. Mientras una persona “pasa trabajo”, tratando de empujar un vehículo que no se mueve, desde el punto de vista de la Física, no efectúa trabajo alguno. En este capítulo veremos por qué. El concepto de energía, abstracto por naturaleza, creó un marco referencial en todas las ramas de las ciencias, a tal punto que muchos aspectos de nuestra vida social, productos del desarrollo vertiginoso de la tecnología, han sido impactados por el uso de dicho concepto.

11.1 TRABAJO

El vocablo “trabajo” tiene muchos significados en la vida cotidiana. Cuando alguien se dirige a su oficina para cumplir con obligaciones “de trabajo” lo que hace es realizar las

tareas que tiene encomendadas. Cuando una persona está en mala situación socioeconómica, “está pasando trabajo”. Cuando alguien se esfuerza por lograr el éxito, “trabajó mucho para lograrlo”. Esto da idea de las variadas connotaciones de la palabra “trabajo”.



¿Quién está realizando un trabajo? ¿Quién está pasando trabajo?

En Física el significado de “trabajo” es más preciso. Trabajo se define como *el proceso mediante el cual una fuerza que actúa sobre un objeto, produce el desplazamiento del mismo*.

De la definición anterior se deduce que, para que haya trabajo desde el punto de vista de la Física, se requiere:

- La presencia de una fuerza que actúe sobre el objeto.
- El desplazamiento del objeto debido a la fuerza.

A los fines de determinar el *trabajo realizado por la fuerza aplicada*, es necesario identificar cuál es *la fuerza que produce el desplazamiento*, así como la magnitud de este último.

El trabajo se expresa, matemáticamente, mediante la relación:

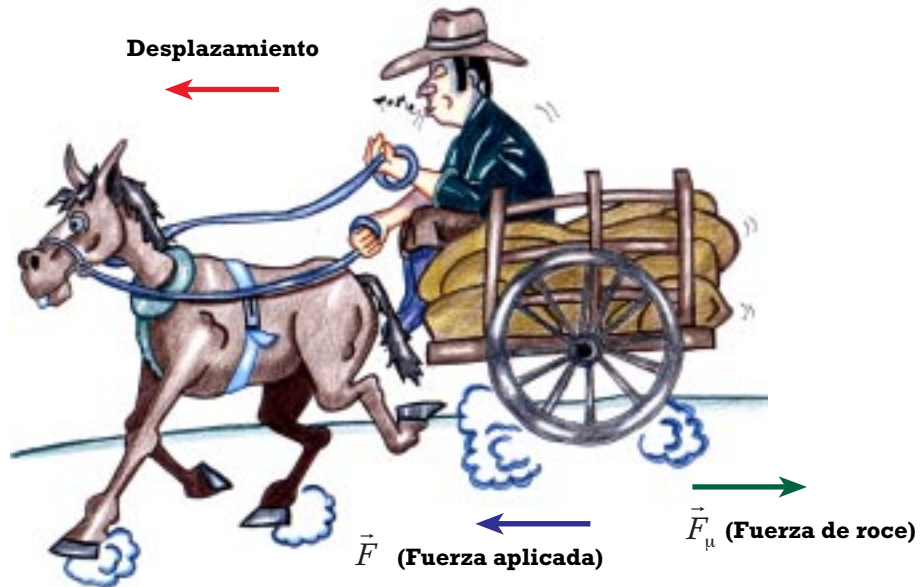
$$T = F \cdot d \quad (11.1)$$

Donde F es la magnitud de la fuerza que causa el desplazamiento y d es la distancia recorrida *en la misma dirección de la fuerza*.

Como ejemplos de situaciones que ponen de manifiesto el concepto de trabajo, podemos citar las siguientes:

- La fuerza F ejercida por un caballo, al tirar de una carreta. En este caso, el desplazamiento de la carreta se produce en la misma dirección de la fuerza aplicada. La fuerza de fricción se opone al movimiento de la carreta y es contra

esa fuerza que se realiza el trabajo de la fuerza producida por el caballo.

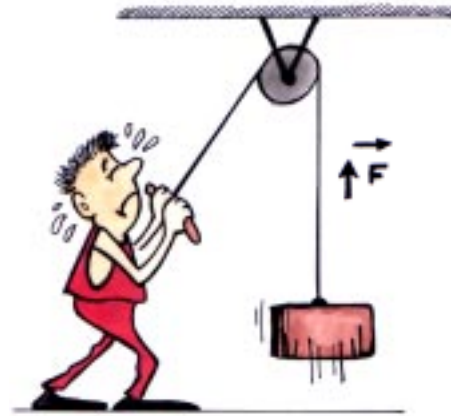


- La fuerza ejercida por una persona sobre una pared. Al no haber desplazamiento y a pesar de que la persona suda y “pasa trabajo”, el trabajo efectuado es nulo.



- Un mesonero lleva una bandeja con comida hacia una mesa. Aunque se desplaza hacia la derecha, la fuerza que hace para sostener la bandeja es hacia arriba. En este caso, el desplazamiento no tiene la misma dirección de la fuerza (forma 90° con ella) y el trabajo realizado contra la fuerza gravitatoria es igual a cero.

- El hombre que levanta un objeto, mediante una polea, ejerce una fuerza que se transmite a través de la cuerda. Tanto la fuerza como el desplazamiento tienen la misma dirección (hacia arriba) y, por tanto, se produce un trabajo en contra de la fuerza de gravedad que trata de llevar la masa hacia abajo.



La unidad fundamental de trabajo es el Joule, que se designa con la letra J . De acuerdo a la relación (11.1):

$$1 \text{ Joule} = 1 \text{ Newton} \cdot 1 \text{ m} \Rightarrow J = N \cdot m$$

Entonces, un Joule puede definirse como el trabajo realizado por una fuerza de un Newton, cuando la misma produce un desplazamiento de un metro.

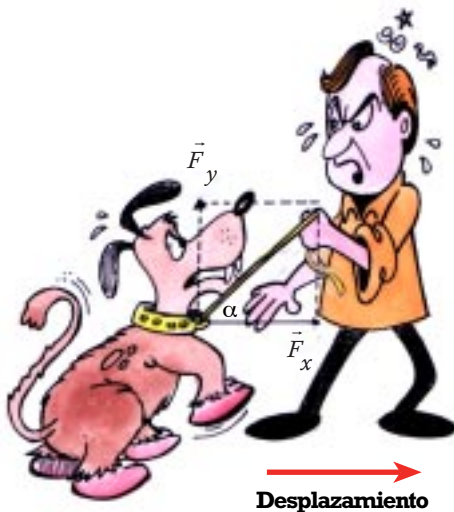


Fig. 11.1 Sólo la componente horizontal de la fuerza, $\vec{F}_x$, produce trabajo, ya que tiene la misma dirección del desplazamiento.

Es importante observar que la fuerza que produce trabajo sobre un objeto es aquella que tiene la misma dirección del desplazamiento. Observemos la fig. 11.1, donde un perro es halado mediante una cuerda, que forma un ángulo α con la horizontal.

La fuerza $\vec{F}$ es descompuesta en sus componentes vertical ($\vec{F}_y$) y horizontal ($\vec{F}_x$). Sólo la componente horizontal, $\vec{F}_x$, produce trabajo, ya que tiene la misma dirección del desplazamiento. La componente $\vec{F}_y$ está dirigida hacia arriba, dirección en la cual no se produce desplazamiento alguno.



Fig. 11.2 Ejemplo 11.1.

Ejemplo 11.1

El levantador de pesas de la fig. 11.2 levanta 200 kg, a una altura de 2,20 m. ¿Qué trabajo realiza ($g = 10 \text{ m/s}^2$)?

Solución

Tanto la fuerza que ejerce el levantador de pesas como el desplazamiento tienen la misma dirección (hacia arriba). La fuerza que debe realizar el levantador de pesas se corresponde con el peso a levantar, dado por:

$$P = m \cdot g = 200 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 2.000 \text{ N}$$

Con $d = 2,20 \text{ m}$ el trabajo realizado es:

$$T = 2.000 \text{ N} \cdot 2,20 \text{ m} = 4.400 \text{ J}$$

11.2 ENERGÍA

El concepto de energía surgió de la capacidad prodigiosa de abstracción de la mente humana. Lentamente, fue tomando forma en los distintos caminos de la ciencia hasta llegar a convertirse en uno de los conceptos más importantes. Ya hicimos notar que Galileo echó por tierra la falsa idea aristotélica, la cual establecía que entre dos objetos de distintas masas caía más rápidamente a la Tierra aquél que era más pesado. Aun cuando numerosos experimentos corroboraron que, en ausencia de fricción, los objetos caen *simultáneamente*, no dejaba de llamar la atención a los físicos que un cuerpo pesado hace más daño al caer que uno más liviano. Leibniz observó que el impacto de un cuerpo que cae tiene que ver con dos factores: el peso del cuerpo y la altura del mismo. Así, un bloque lanzado desde 10 m de altura hará más daño que otro que cae desde 1 m. Conociendo la relación entre la velocidad alcanzada y la altura desde donde se deja caer un objeto, Leibniz llegó a la conclusión que a mayor velocidad había más capacidad para hacer más daño, ya que el impacto era mayor. A ese impacto que podía dañar a un objeto, Leibniz lo llamó *vis viva* (fuerza viva) y, la fórmula que usó para describirla es la misma que actualmente se utiliza para la *energía cinética*.

A comienzos del siglo XIX, Camot concibió la idea en torno a que un objeto, por el sólo hecho de estar a una altura determinada, poseía la capacidad de crear *vis viva* (energía cinética) al caer. A esta capacidad la llamó *vis viva latente*, que corresponde a lo que

actualmente se conoce como *energía potencial*.

En 1807, Thomas Young propuso, por primera vez, la palabra “energía” para reemplazar al término *vis viva* y tuvo, además, la genial idea, ignorada durante décadas, de definir la energía como *la capacidad para realizar un trabajo*. De acuerdo a esto, un cuerpo en movimiento o colocado a cierta altura, es capaz de efectuar un trabajo. Es decir, tiene la facultad de generar una fuerza sobre otro objeto para producir el desplazamiento del mismo.

Al conjunto constituido por la energía cinética y la energía potencial de un cuerpo se le conoce como *energía mecánica*. Entonces, un objeto posee energía mecánica si está en movimiento, está situado a una cierta altura con respecto a una posición o nivel de referencia o si reúne ambas condiciones.

Aparte de la energía cinética y la energía potencial, con frecuencia oímos acerca de los siguientes tipos de energía:

Energía Eléctrica: corresponde a los fenómenos electromagnéticos que generan electricidad para mover motores, producen iluminación urbana o residencial y permiten el uso extensivo de equipos electromecánicos.

La energía eléctrica se convierte en energía cinética.



Energía eólica: es aquella asociada con el movimiento de las masas de aire. El viento, al soplar, es capaz de hacer mover las aspas de ventiladores conectados a motores que, al girar, producen electricidad.

Energía calórica: se asocia al calentamiento de la materia (sólidos, líquidos y gases) y a la capacidad para producir trabajo. Las máquinas de vapor funcionan debido al calor generado en calderas que, luego, impulsa las partes necesarias para generar desplazamientos en pistones. Este mismo principio se utiliza en los motores de gasolina de los automóviles, donde la explosión de una mezcla de gasolina con aire produce calor, que impulsa los pistones en el interior de los cilindros del motor.



Luz y energía radiante: la luz es la energía vital para todos los seres que habitan el planeta Tierra. Todas las plantas verdes dependen de la energía que, en forma de luz, nos proporciona el Sol. La cadena alimenticia y energética que se genera, mantiene el equilibrio biológico en el astro que habitamos. Otras formas de energía radiante las constituyen las ondas electromagnéticas, las ondas ultra violetas (de las cuales hay que cuidarse por el daño que ocasionan a la piel) y los rayos X, de tanta difusión en medicina.



Energía química: almacenada, fundamentalmente, en combustibles, sustancias químicas y alimentos. Los seres vivos, al ingerir los componentes básicos de su dieta diaria, adquieren el potencial para realizar trabajo. La energía acumulada en la gasolina, la madera, el gas metano, el carbón, se utiliza cada vez que iniciamos un proceso que implique la realización de un trabajo.

Energía nuclear: es la energía latente en el núcleo de los átomos, capaz de proporcionar vías para usos pacíficos o para la destrucción. Cuando genera calor en forma controlada puede usarse en la generación de electricidad, movimiento de motores, etc. Cuando se utiliza con fines bélicos, su poder destructivo se convierte en una pesadilla para la raza humana y toda forma de vida sobre la tierra.



11.3 CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

En el año 1699, el matemático holandés Christian Huygens publicó los resultados de sus investigaciones, sobre lo que sucedía cuando colisionaban objetos en movimiento. Al hacer chocar dos bolas de billar, pudo determinar que “la suma de la *viz viva* de las bolas antes y después del impacto permanecía constante”. En los tiempos actuales se diría que la energía cinética se conserva antes y después del impacto. En esa observación de Huygens está contenido uno de los principios fundamentales de la ciencia actual, la *ley de la Conservación de la Energía*, que se expresa de la manera siguiente:

La energía no puede ser creada ni destruida. Puede transformarse de una forma a otra, pero la cantidad total de energía permanece constante.

Esta ley es completamente general y se aplica a cualquier proceso natural o producto del ingenio humano. En la fig. 11.3 se escenifica cómo se produce un ciclo natural de conversión de energía.



Fig. 11.3 Conversión de energía.

La energía radiante, procedente del Sol, calienta las aguas de océanos y otros reservorios de agua. Como consecuencia, el calor producido hace que el agua se evapore y ascienda a la atmósfera, donde adquiere energía potencial. Al producirse la lluvia, las gotas de agua, al caer, adquieren energía cinética, la cual se almacena en la represa en forma de energía potencial. Al caer el agua sobre la turbina, la energía potencial vuelve a transformarse en energía cinética. La turbina, al moverse, produce energía eléctrica que es transmitida por las líneas de transmisión hasta las ciudades y fábricas. Allí, es convertida, en parte, en fuente de luz (energía radiante).

11.4 ENERGÍA CINÉTICA

La energía cinética es la energía asociada con el movimiento. Un objeto que se mueve, vertical, u horizontalmente, posee energía cinética. Consideremos un bloque que, estando inicialmente en reposo, se le aplica una fuerza $\vec{F}$ para moverlo, como se muestra en la fig. 11.4. Como resultado, el bloque se desplaza una distancia d . Entonces, el trabajo efectuado por $\vec{F}$ está dado por:

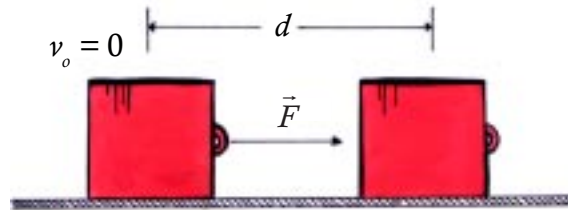


Fig. 11.4 La fuerza $\vec{F}$ produce un desplazamiento del bloque.

$$T = F \cdot d \quad (11.2)$$

Si la fuerza permanece constante a lo largo del recorrido, la aceleración también se mantendrá constante. Como $F = m a$, podemos escribir:

$$T = (m \cdot a) \cdot d \quad (11.3)$$

Durante el desplazamiento, el bloque adquiere una velocidad, cuyo módulo puede calcularse mediante la relación:

$$\text{Como } v_o = 0, \quad v^2 = v_o^2 + 2ad$$

$$v^2 = 2ad \quad \Rightarrow \quad a = \frac{v^2}{2d}$$

Sustituyendo este último valor en (11.3):

$$T = m \cdot \frac{v^2}{2d} \cdot d \quad \Rightarrow \quad T = \frac{1}{2}mv^2$$

La cantidad $T = 1/2mv^2$, resultado del trabajo efectuado por la fuerza sobre el bloque, recibe el nombre de *energía cinética traslacional* y se corresponde exactamente en magnitud con dicho trabajo. La energía cinética se expresa también en joules y se representa mediante la letra K :

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (11.4)$$

La expresión anterior revela que, a medida que aumentan la masa y la velocidad de un objeto, mayor será el impacto que puede producir sobre otro con el cual choca. El hecho de que la velocidad aparezca elevada al cuadrado multiplica considerablemente este efecto. Entonces, si un objeto duplica su velocidad, fig. 11.5, su energía cinética se cuadruplica, lo cual indica que la fuerza que lo impulsa necesita hacer cuatro veces más trabajo para alcanzar esa velocidad. En consecuencia, un vehículo que viaja a una velocidad igual al doble de otro, necesita cuatro veces más trabajo para detenerlo que para detener a este último.



Fig. 11.5 Un carro que marcha a 100 km/h posee cuatro veces más energía cinética que uno que va a 50 km/h y recorrerá, en caso de un frenazo violento, también cuatro veces la distancia que recorre este último para detenerse .

La energía cinética puede manifestarse en otras formas de energía, tales como la energía térmica o calórica, cuyo origen es el movimiento aleatorio de moléculas; la energía vibracional, mediante la cual un objeto vibra sin desplazarse; la energía radiante, proveniente del movimiento de electrones dentro de los átomos; la energía rotacional, presente en un objeto que rota.

Ejemplo 11.2

El muchacho de la fig. 11.6 tiene una masa de 60 kg y se mueve a una velocidad de 6 km/h. a) ¿Cuál es su energía? b) ¿Cuál es su energía cinética si duplica su velocidad?

Solución

a) 6 km/h equivalen a:

$$6 \frac{\text{km}}{\text{h}} \Rightarrow \frac{6.000 \text{ m}}{3.600 \text{ s}} = 1,67 \text{ m/s}$$

Luego:

$$K = \frac{1}{2} \cdot 60 \text{ kg} \cdot (1,67 \text{ m/s})^2 = 83,67 \text{ J}$$



Fig. 11.6 Ejemplo 11.2.

b) Si $v = 12 \text{ km/h}$:

$$12 \text{ km/h} = \frac{12.000 \text{ m}}{3.600 \text{ s}} = 3,33 \text{ m/s}$$

Entonces:

$$K = \frac{1}{2} \cdot 60 \text{ kg} \cdot (3,33 \text{ m/s})^2 = 332,67 \text{ J}$$

Como se observa, la energía cinética se cuadruplicó, al duplicarse la velocidad.

11.5 ENERGÍA POTENCIAL

Un objeto puede almacenar energía por la posición que ocupe, en relación con un nivel de referencia. A esta energía de posición se le conoce como *energía potencial*. Entonces podemos afirmar:

La energía potencial de un objeto es aquella energía que es capaz de generar un trabajo, como resultado de la posición del mismo.

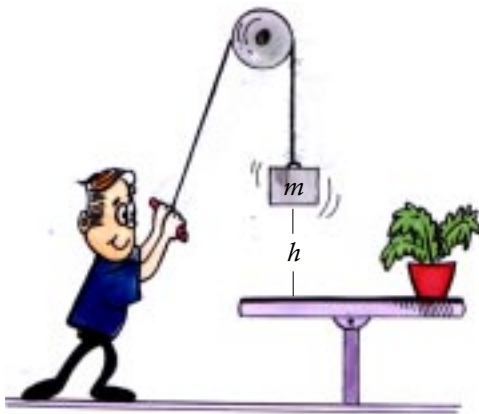


Fig. 11.7 El bloque posee energía potencial debida a su altura sobre el subibaja.

En la fig. 11.7 se muestra la estrecha relación entre energía y trabajo. El hombre, al levantar el bloque, aplica una fuerza sobre el mismo (mediante la cuerda), que permite elevarlo a una altura h con respecto a la tabla del subibaja. De esta forma, el hombre realiza un trabajo. En esta posición, el bloque adquiere energía potencial. Si el hombre suelta la cuerda, el bloque cae, la energía potencial se convierte en energía cinética y, al golpear sobre la tabla del subibaja, la desplaza hacia abajo (otra vez se produce trabajo) y hace que la planta situada al otro lado del subibaja se desplace hacia arriba.

Para deducir una expresión de la energía potencial, estudiemos lo que sucede en la fig. 11.7. Cuando el hombre levanta el bloque, realiza un trabajo en contra de la fuerza de gravedad. De allí que ejerza una fuerza igual al peso del bloque:

$$T = F \cdot d \quad \Rightarrow \quad T = (m \cdot g) \cdot h = mgh$$

Es decir, el trabajo efectuado por el hombre se ha convertido en la expresión mgh , que se denomina *energía potencial gravitacional*. A esta energía se le designa por la letra U_g :

$$U_g = mgh \quad (11.5)$$

La energía potencial gravitacional depende, entonces, de la masa de un objeto (o del peso del mismo) y de su posición vertical. La expresión “gravitacional” está relacionada con la fuerza de gravedad que ejerce la Tierra sobre los objetos situados en su cercanía, la cual se manifiesta a través del peso.

Con el fin de determinar la energía potencial gravitacional de un objeto, se selecciona un nivel o referencia sobre el cual se mide su altura. Esta referencia es completamente arbitraria y se escoge convenientemente. Es usual tomar como referencia la superficie terrestre; pero, otros niveles de referencia son también posibles. Así, el bloque de la fig 11.7 puede tener como nivel de referencia la altura h sobre la tabla del subibaja, en cuyo caso la energía potencial es mgh . Si se toma como referencia el piso, la altura es mayor y, por tanto, su energía potencial es más grande.

Aparte de la energía potencial gravitacional, podemos citar otras formas de energía potencial. Hablamos de *energía potencial elástica*, en el caso de materiales u objetos elásticos como producto de la compresión o expansión de los mismos. Por ejemplo, cuando se somete a compresión un resorte metálico, al soltarse es capaz de realizar un trabajo. La *energía química*, almacenada en líquidos combustibles, como la gasolina y la energía almacenada en alimentos, son ejemplos de energía potencial.

Ejemplos elocuentes de la energía potencial elástica, almacenada en algunas plantas, nos los ofrecen los mecanismos que las mismas usan para diseminar sus semillas. La planta conocida como “brillantina” (*Impatiens wallerana*) crece en zonas altas y frías en algunos pueblos de Venezuela, usualmente bajo la sombra de otros árboles. Como se indica en la fig. 11.8, las semillas de esta planta se encuentran en una cápsula formada por cinco divisiones que, al ser sometida a presión en el vértice B, se enrolla violentamente, en una acción parecida a la de un resorte cuando se estira y luego, se suelta. Esta acción violenta, hace que las paredes que conforman la cápsula arrastren a las semillitas a gran velocidad y las dispersen.



Fig. 11.8 Las semillas de la planta “brillantina” (*Impatiens wallerana*), encerradas dentro de una cápsula, son lanzadas violentamente al enrollarse las paredes de la misma. La energía potencial elástica almacenada en la cápsula, activa el mecanismo de la diseminación de las semillas.

Ejemplo 11.3

Frank, cuya masa es de 50 kg sueña que está volando a una altura de 50 m sobre la superficie terrestre a una velocidad de 20 km/h. De pronto, se despierta y comienza a caer libremente. **a)** ¿Cuál es su energía cinética mientras vuela? ¿Cuál es su energía potencial? **b)** ¿Cuáles son los valores de sus energías cinética y potencial cuando está a 20 m sobre el suelo? **c)** ¿Con qué velocidad choca Frank cuando alcanza el suelo?

Solución

a) La velocidad de Frank en m/s es:

$$v = \frac{20 \cdot 1.000}{3.600} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 5,56 \text{ m/s}$$

Su energía cinética y su energía potencial están dadas por:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 50 \text{ kg} \cdot (5,56 \text{ m/s})^2 = 772,84 \text{ J}$$

$$U_g = mgh = 50 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 50 \text{ m} = 24.500 \text{ J}$$

b) Cuando Frank se detiene, su energía cinética se hace cero, mientras que su energía potencial permanece igual al valor determinado anteriormente. A medida que cae, su energía potencial gravitatoria inicial se desdobra en energía potencial y energía cinética:

$$mgh_1 = mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2^2$$

Donde h_1 y h_2 son las alturas sobre el piso cuando Frank comienza a caer y cuando está a 20 m del piso, respectivamente. Eliminando m :

$$gh_1 = gh_2 + \frac{1}{2}v_2^2$$

Despejando v_2 :

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} = \sqrt{2 \cdot 9,8(50 - 20)} = \sqrt{588} = 24,25 \text{ m/s}$$

La energía cinética es:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 50 \text{ kg} \cdot 588 \text{ (m/s)}^2 = 14.700 \text{ J}$$



La energía potencial es:

$$U_g = mgh = 50 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 20 \text{ m} = 9.800 \text{ J}$$

c) Cuando Frank choca contra el suelo, toda la energía potencial inicial se transforma en energía cinética:

$$mgh_1 = \frac{1}{2}mv^2$$

Despejando la velocidad:

$$v = \sqrt{2gh_1} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 50} = 31,30 \text{ m/s}$$



PIENSA Y EXPLICA



- 11.1** Define el concepto de trabajo.
- 11.2** Cita algunos ejemplos donde la palabra trabajo no tenga relación con el concepto que, en Física, se tiene del mismo.
- 11.3** Identifica y comenta sobre las cantidades que aparecen en la expresión que define el trabajo.
- 11.4** ¿Cómo la persona mostrada, fig 11.9, puede hacer un gran esfuerzo físico, al empujar un objeto que permanece inmóvil, y no realizar trabajo alguno?
- 11.5** El hombre de la figura 11.10, que cuelga de la cuerda, ¿está realizando un trabajo, o “está pasando trabajo”?



Fig. 11.9 Piensa y explica 11.4.



Fig. 11.10 Piensa y explica 11.5.

- 11.6** ¿Realiza la mesonera de la fig. 11.11 algún trabajo al llevar la bandeja?
- 11.7** Si el hombre de la figura 11.12 arrastra al pájaro por una distancia de 20 m, ejerciendo una fuerza de magnitud igual a 100 N, ¿por qué el trabajo realizado no es igual a 2.000 J?
- 11.8** ¿Podrías mencionar cómo surgió el concepto de energía? ¿A qué se llamó “vis viva”?



Fig. 11.11 Piensa y explica 11.6.



Fig. 11.12 Piensa y explica 11.7.

- 11.9** ¿Cómo definió Thomas Young la energía?
- 11.10** ¿Qué es energía mecánica?
- 11.11** ¿Cómo definió Carnot la energía potencial?
- 11.12** Aparte de las energías cinética y potencial, ¿qué otros tipos de energía puedes mencionar? Descríbelas.
- 11.13** ¿Por qué se considera a la luz como “energía vital”?
- 11.14** ¿Es buena la energía nuclear?
- 11.15** ¿Cómo enunció Huygens la ley de la conservación de la energía?
- 11.16** ¿Cómo se expresa actualmente la ley de la conservación de la energía?
- 11.17** Describe con tus propias palabras el ciclo natural de transformación de energías, mostrado en la fig. 11.3.

- 11.18** ¿Qué es energía cinética?
- 11.19** ¿Por qué se utiliza el término “energía cinética traslacional”? ¿Hay algún otro tipo de energía cinética?
- 11.20** ¿Cuál es la relación que permite obtener la energía cinética traslacional de un objeto?
- 11.21** ¿Qué es energía potencial?
- 11.22** ¿En qué unidades se expresan las energías cinética y potencial?
- 11.23** ¿Qué tipo de energía posee la gasolina? ¿Cómo podrías relacionarla con el movimiento de un vehículo que la utiliza?
- 11.24** Explica cómo el trabajo que se efectúa sobre un objeto se convierte en energía potencial gravitacional.
- 11.25** Aparte de la energía potencial gravitacional, ¿qué otras formas de energía potencial puedes mencionar?
- 11.26** Explica lo del nivel de referencia en el caso de la energía potencial gravitatoria.
- 11.27** Explica, en términos de la energía, por qué una gomera que se estira más que otra, puede lanzar una piedra más lejos.

**PROBLEMAS**

- 11.1** Calcula la energía potencial gravitatoria y la energía cinética de un ave de masa 400 g que vuela a 60 km/h, a una altura de 40 m.
- 11.2** El hombre de la fig. 11.13 empuja la máquina de podar con una fuerza horizontal de 7 N por una distancia de 5 m hacia la derecha y, luego, retrocede 5 m hacia la izquierda. ¿Qué trabajo efectúa?

**Fig. 11.13 Problema 11.2.**

- 11.3** El pájaro de la fig. 11.14 sostiene una cajita de 0,5 kg. **a)** ¿Qué trabajo realiza sobre la cajita al mantenerla a 20 m de altura? **b)** ¿Qué trabajo realiza la fuerza de gravedad cuando el pájaro la deja caer y alcanza la superficie terrestre? **c)** ¿Cuál es la energía potencial de la caja al comenzar la caída?
- 11.4** En la fig. 11.15 se aplica una fuerza de 100 N al martillo, y el clavo se introduce una distancia de 8 mm. ¿Qué trabajo efectúa la persona? ¿En qué tipo de energía se transforma ese trabajo?
- 11.5** El esquiador de la fig. 11.16 y su equipo pesan 80 kg. En ausencia de fricción, **a)** ¿Qué trabajo se hizo contra la fuerza de la gravedad para llevarlo al tope de la colina? **b)** ¿Cuál es la energía potencial del esquiador cuando está en el tope de la colina? **c)** ¿Cuál es la energía potencial del esquiador en su punto más bajo? **d)** ¿Cuál es la energía cinética cuando el esquiador llega a nivel del suelo, luego de estar en el tope de la colina? **e)** ¿Cuáles son las energías potencial y cinética en la colina de 10 m de altura?

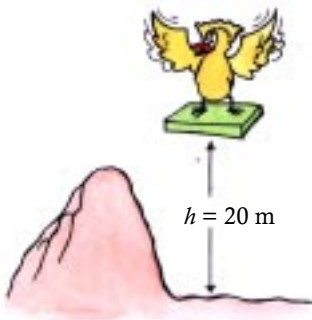


Fig. 11.14 Problema 11.3.



Fig. 11.15 Problema 11.4.

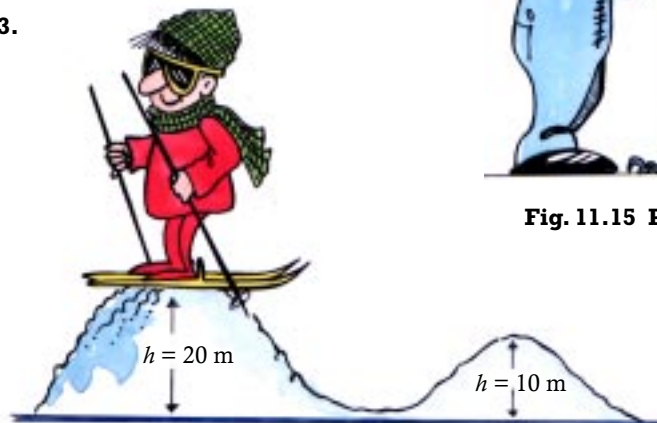
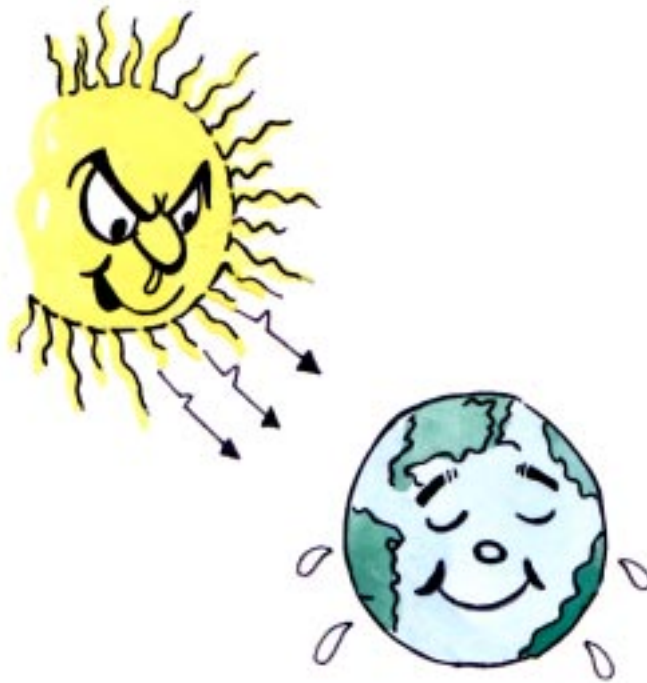


Fig. 11.16 Problema 11.5.

CAPÍTULO 12



Temperatura y Calor

No hay dudas acerca de que el hombre trata de relacionar las condiciones ambientales que lo rodean con lo que perciben sus sentidos. Las sensaciones de “frío” y “calor” están asociadas sensorialmente a las condiciones de bajas y altas temperaturas. Así, cuando pensamos en bajas temperaturas, asociamos a las mismas imágenes como hielo, neveras, acondicionadores de aire, mientras que a las temperaturas altas las vinculamos al fuego, al Sol, a objetos calientes.

Cuando en un comienzo se trató de explicar los orígenes del calor, se postuló que éste era una especie de fluido, al que se llamó *calórico*, que podía penetrar o salir de un cuerpo. Actualmente, esta teoría ha sido desechada y modernamente se explican, tanto la temperatura como el calor, con base en el comportamiento molecular y atómico de las sustancias u objetos sometidos a la influencia de variables externas.

Es importante enfatizar la relevancia que el estudio de la temperatura y el calor tienen para el bienestar de la humanidad. Las técnicas de conservación de alimentos, la noción de salud, en términos de la medición de la temperatura corporal, la producción de energía eléctrica, usando el calor como agente primario, el estudio del efecto invernadero, que amenaza la vida en nuestro planeta, no son más que algunos aspectos que revelan la necesidad de comprender los fenómenos físicos de la temperatura y el calor.

12.1 TEMPERATURA Y ENERGÍA



Todas las sustancias están constituidas por átomos. A la vez, estos últimos se asocian en moléculas, el gran conjunto de las cuales conforman todos los materiales conocidos.

Las moléculas dentro de la materia están en constante movimiento y ejercen entre sí fuerzas de naturaleza eléctrica. El movimiento de las moléculas está asociado a su energía cinética, mientras que las fuerzas eléctricas están asociadas a la energía potencial intermolecular.

En la fig. 12.1 se indican los posibles movimientos moleculares dentro de cualquier sustancia. El dibujo muestra una molécula formada por 2 átomos. El resorte que los une, representa la energía potencial de la molécula.

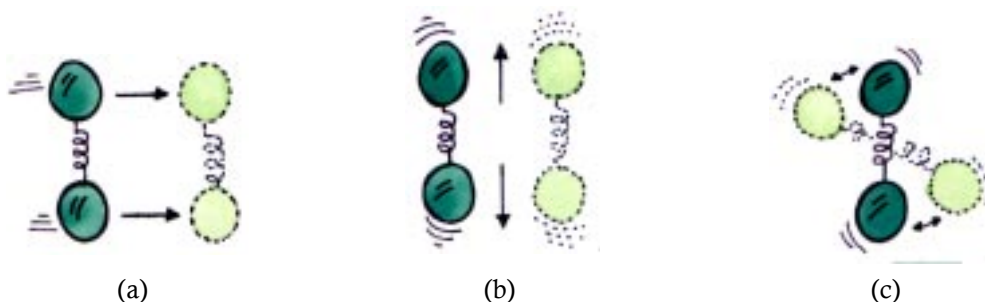


Fig. 12.1 El movimiento de una molécula: a) Traslacional. b) Vibracional. c) Rotacional.

En la fig. 12.1(a) la molécula cambia de posición en el espacio desplazándose de un sitio a otro. El movimiento es de traslación y se habla de *energía cinética traslacional*. En la fig. 12.1(b) los átomos de la molécula se estiran y se encogen en alrededor de una misma posición inicial. No hay traslación. En este caso, la molécula posee *energía cinética vibracional*. Finalmente, en la fig. 12.1(c) la molécula rota, dando origen a *energía cinética rotacional*. Tampoco hay traslación de la molécula como un todo, en este último caso.

Aun cuando el efecto causado por una molécula aislada puede ser insignificante, en una cantidad relativamente pequeña de una sustancia cualquiera se concentran miles de millones de moléculas y la acción de este gran conglomerado de partículas resulta muy significativa.

La temperatura está íntimamente ligada al movimiento traslacional y, por lo tanto, a la energía traslacional de las moléculas. Más exactamente, se dice que la temperatura está asociada a la energía cinética promedio traslacional de las moléculas.

La energía cinética traslacional, junto con las energías cinéticas vibracional y rotacional, así como la energía potencial, constituyen la energía interna de las moléculas. Sin embargo, sólo la energía cinética traslacional contribuye al valor de la temperatura de una sustancia u objeto.



Las moléculas en una sustancia se mueven al azar, en una forma desordenada. La energía cinética traslacional está asociada a este movimiento aleatorio y *la temperatura es una medida de esta energía desordenada*. De allí que a la temperatura se la identifique como *energía térmica*.

Las sensaciones de “caliente” o “frío” están, precisamente, identificadas con el estado de energía térmica de las sustancias. Cuando tocamos un objeto y lo sentimos “caliente” es porque existe un alto grado de energía térmica en el mismo. Por lo contrario, cuando lo sentimos “frío” su nivel de energía térmica es menor.

12.2 TEMPERATURA Y CALOR

A menudo, los conceptos de temperatura y calor son confundidos. Esto es debido a que los dos términos están íntimamente relacionados. Ya vimos que la temperatura es una medida de la energía térmica molecular. Cuando dos objetos de temperaturas diferentes entran en contacto, la energía térmica se transfiere del objeto más caliente al más frío. Dichos objetos intercambian energía térmica hasta que se alcanza un estado de *equilibrio térmico* que iguala las temperaturas de ambos. Decimos, entonces, que fluye calor desde el objeto más caliente al más frío. Bajo este esquema, *el calor está relacionado con la transferencia de energía de un objeto a otro: es energía en movimiento*.

El calor es la energía que fluye espontáneamente de un objeto de más alta temperatura a otro de más baja temperatura, a través de las interacciones aleatorias de sus moléculas.

Como resultado de esa transferencia de energía, un objeto puede aumentar o disminuir su temperatura. De allí, tal vez, resulte la confusión entre temperatura y calor.

Muchos mecanismos pueden ser utilizados para calentar un cuerpo mediante la transferencia de energía. Consideremos, por ejemplo, que se desea calentar agua utilizando un recipiente de vidrio y una cocina a gas, como se indica en la fig 12.2. La energía química almacenada en el gas es llevada a través de un tubo al quemador de la hornilla. Cuando se enciende un fósforo, se realiza trabajo en contra de la fricción para romper los enlaces químicos en la sustancia que forma la cabeza del palillo de fósforo. Las moléculas y átomos liberados se combinan con el oxígeno del aire, liberando energía térmica. Esta energía se transfiere al gas que se enciende. La llama que se origina produce calor, el cual se propaga hacia el recipiente de vidrio y, de allí, hacia la masa de agua, lo cual hace aumentar de temperatura de ambos.



Fig. 12.2 Transferencia de energía en el calentamiento de agua en una cocina a gas.

Del ejemplo anterior, puede darse una cuenta de la complejidad de los procesos energéticos, donde hay intercambios permanentes de una forma de energía a otra.

Es importante hacer notar aquí que un incremento de calor no necesariamente va acompañado de un aumento de la temperatura. El agua, por ejemplo, hierve a una temperatura fija ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) y por más que se le transfiera calor adicional, este valor permanece constante.

Un aumento de calor no siempre va acompañado de un aumento de temperatura.





PIENSA Y EXPLICA



- 12.1** ¿Qué era el calórico?
- 12.2** ¿Qué tipos de movimientos tienen las moléculas dentro de una sustancia? Representalos esquemáticamente.
- 12.3** ¿A qué fenómeno físico están asociadas las energías cinéticas y potencial de las moléculas de una sustancia?
- 12.4** ¿A qué tipo de energía cinética de las moléculas está asociada la temperatura de un objeto?
- 12.5** ¿Qué es la energía interna de una sustancia?
- 12.6** ¿Qué es el efecto invernadero? Haz una investigación al respecto.
- 12.7** Da una definición de temperatura.
- 12.8** ¿Qué es equilibrio térmico?
- 12.9** Define calor. ¿Cuál es la diferencia con temperatura?
- 12.10** ¿Cómo se producen las transformaciones de energía en el calentamiento de agua de la fig. 12.2?
- 12.11** Cuando se suministra calor a una sustancia, ¿se produce siempre un aumento de temperatura?
- 12.12** La expresión: “la materia posee calor” es incorrecta. ¿Por qué?
- 12.13** ¿Cómo fluye el calor en objetos que están a distintas temperaturas?

12.3 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

Para medir la temperatura se utilizan los termómetros, instrumentos basados en la variación de alguna magnitud física cuando aumenta o disminuye la temperatura. Los termómetros más comunes se basan en la contracción o expansión de un líquido cuando disminuye o aumenta la temperatura. El líquido, usualmente alcohol coloreado o mercurio, se mantiene encerrado en un recipiente de vidrio y sube o baja por un tubo muy delgado, ubicado en el interior del recipiente (fig. 12.3).

¿Cómo se gradúa un termómetro? Para medir la temperatura se utilizan, en la práctica diaria, las llamadas escalas *Celsius* y *Fahrenheit*. En el mundo científico se utiliza la escala *absoluta* o *Kelvin*. Tanto la escala Celsius como la escala Fahrenheit usan como puntos de referencia las condiciones de congelación y de ebullición del agua. Como el agua se congela y hierve a temperaturas que son fáciles de conseguir en la práctica, es la sustancia usualmente utilizada para establecer una escala termométrica. Las escalas de temperatura se expresan en grados.

Fahrenheit, mediante una mezcla de hielo y sal, estableció el punto de congelación del agua en 32 grados. El punto de ebullición lo fijó en 212 grados. Entre esos dos puntos hay 180 grados. Los grados Fahrenheit se designan como °F.

Celsius introdujo su escala de temperatura, basada, también, en los puntos de congelación y ebullición del agua. Al punto de congelación le asignó el número 0 y al de ebullición el número 100. Entonces, entre esos dos puntos existen 100 grados. Los grados centígrados se designan como °C.

La escala absoluta o Kelvin, usada ampliamente en las ciencias, parte de la mínima temperatura que una sustancia puede tener. Teóricamente, este valor es de $-273,15^{\circ}\text{C}$ que se denomina *cero absoluto*. A esta temperatura cesa todo movimiento molecular. Esta temperatura nunca ha sido alcanzada, aunque se han logrado valores cercanos a ella. La temperatura absoluta se mide en grados Kelvin ($^{\circ}\text{K}$).

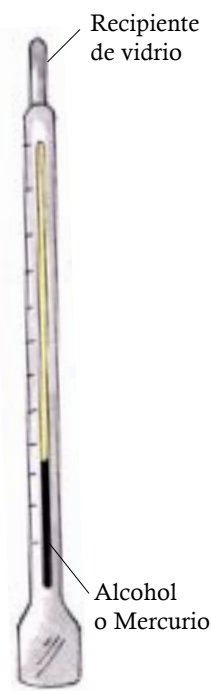


Fig. 12.3 Termómetro



Cuando se alcanza el cero absoluto, cesa todo movimiento molecular.

En la fig. 12.4 se muestran las escalas Celsius y Fahrenheit y algunos puntos destacados en las mismas.

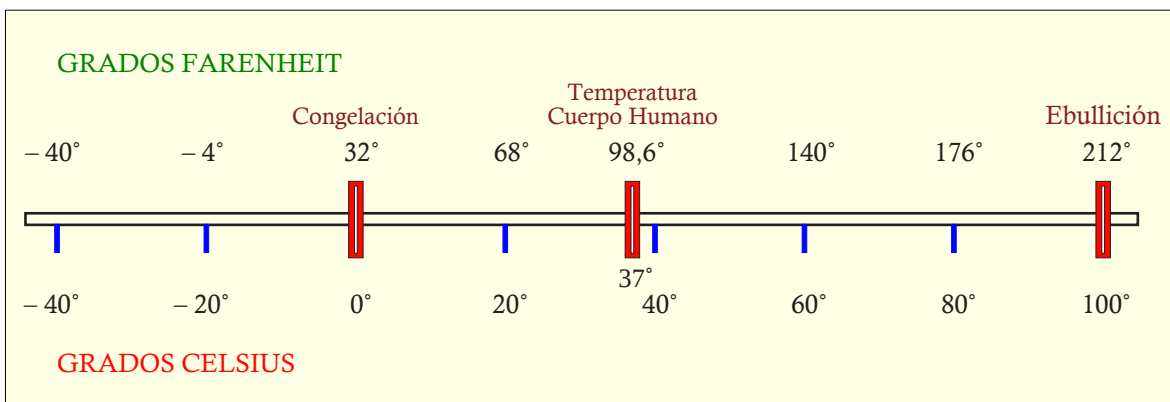


Fig. 12.4 Escalas Celsius y Fahrenheit.

Las fórmulas que relacionan las temperaturas Celsius y Fahrenheit son las siguientes:

$$(12.1) \quad T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32) \quad \Rightarrow$$

Para convertir grados Fahrenheit a grados Celsius se resta 32 a los grados Fahrenheit y el resultado se multiplica por 5/9.

$$(12.2) \quad T_F = \frac{9}{5}T_C + 32 \quad \Rightarrow$$

Para convertir grados Celsius a grados Fahrenheit se multiplican los grados centígrados por 9/5 y al resultado se le suma 32.

donde:

T_C : Temperatura en grados Celsius

T_F : Temperatura en grados Fahrenheit

Entre temperatura Celsius y temperatura absoluta la relación es la siguiente:

$$T_C = T_K - 273,15$$

$$T_K = T_C + 273,15$$

donde T_K es la temperatura absoluta.

Ejemplo 12.1

a) La temperatura normal del cuerpo humano es de 37 °C. ¿Cuál es su valor en grados Fahrenheit? b) El agua se congela a 32 °F ¿Cuál es la temperatura de congelación en °C?

Solución

a) Usando la relación 12.2:

$$T_F = \frac{9}{5} \cdot 37 + 32 \quad \Rightarrow \quad T_F = 66,6 + 32 = 98,6 \text{ °F}$$

b) De acuerdo a (12.1):

$$T_C = \frac{5}{9}(32 - 32) \quad \Rightarrow \quad T_C = \frac{5}{9} \cdot 0 = 0 \text{ °C}$$



PIENSA Y EXPLICA



- 12.14** ¿Con qué se mide comúnmente la temperatura?
- 12.15** Describe brevemente cómo funciona un termómetro de alcohol o de mercurio.
- 12.16** ¿Cuáles son las escalas usadas para medir la temperatura? ¿En qué unidades se expresan?
- 12.17** ¿Cómo se gradúan los termómetros?
- 12.18** ¿Qué es el cero absoluto?
- 12.19** ¿A cuáles temperaturas se congela y hierve el agua? ¿Cuál es la temperatura normal del cuerpo humano? ¿De un delfín? ¿De un pájaro?

- 12.20** Si dos objetos con distintas temperaturas se ponen en contacto y aislados del exterior, ¿qué pasa con sus temperaturas? ¿Cómo se llama el estado que alcanzan?
- 12.21** ¿Por qué se debe mantener por cierto tiempo el contacto de un termómetro con una persona cuando se mide su temperatura?
- 12.22** ¿Cuál es la diferencia entre temperatura y energía interna? ¿Es cierto que un objeto con más energía interna que otro tiene mayor temperatura?
- 12.23** Escribe las fórmulas de conversión entre grados centígrados, fahrenheit y kelvin.

**PROBLEMAS**

- 12.1** El agua hierve a 100°C . ¿Cuál es su temperatura de ebullición en grados kelvin y fahrenheit?
- 12.2** Si una persona tiene una temperatura corporal de 110°F , ¿tiene fiebre? Haz el cálculo de la temperatura en grados centígrados.
- 12.3** El platino se funde a una temperatura de 1.775°C . Expresa ese valor en $^{\circ}\text{F}$ y $^{\circ}\text{K}$.
- 12.4** ¿Cuál de las siguientes temperaturas es la más baja: **a)** -20°C , **b)** -20°F **c)** 250°K ?
- 12.5** En la fig. 12.4 se observa que -40°C corresponden a -40°F . ¿Cómo puedes llegar a esa conclusión usando las relaciones (12.1) y (12.2)?

- 12.6** La temperatura en la parte más baja de la atmósfera (troposfera) disminuye con la altura, de acuerdo con la siguiente relación:

$$T_h = T_s - kh$$

Donde T_s es la temperatura en la superficie terrestre, k es una constante igual a $6,5\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ y h es la altura sobre la superficie terrestre. Si un avión comercial vuela a 10 km de altura y la temperatura sobre el nivel del mar es de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, ¿cuál es la temperatura en el exterior del avión?

12.4 EXPANSIÓN TÉRMICA

Cuando la temperatura de una sustancia o de un objeto se incrementa, sus moléculas se agitan, aumentando la distancia media que las separa. El resultado es la expansión de la sustancia u objeto. Con muy pocas excepciones, la materia se dilata cuando se calienta y se contrae cuando se enfría.

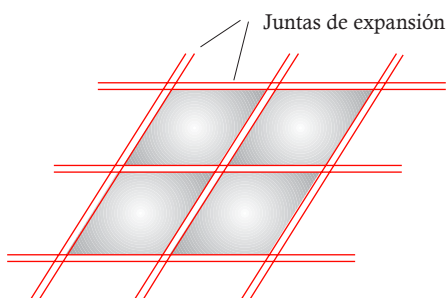


Fig. 12.5 Las juntas de expansión evitan que el piso se resquebraje al expandirse el cemento.

El fenómeno de expansión, como resultado del aumento de temperatura, es usualmente tomado en cuenta en las construcciones civiles y otras aplicaciones de la vida cotidiana. Por ejemplo, cuando se pavimenta un piso es usual dejar juntas de expansión entre los cuadros del mismo, a fin de evitar que se resquebraje al dilatarse el cemento (ver fig. 12.5). Cuando no se toma esa precaución, se producen grietas en el piso fácilmente observables, debido a la fractura del pavimento.

Cuando una tapa de frasco está muy apretada, a menudo da resultado calentar la tapa, de forma que ésta se expanda y pueda ser removida con menos dificultad.



El calentamiento de la tapa del frasco, la hace expandir, facilitando su remoción.

La expansión de las sustancias por efecto de la temperatura depende del tipo de sustancia. Los gases se expanden más fácilmente que los líquidos y éstos más fácilmente que los sólidos, para las mismas condiciones de temperatura.

El *coeficiente lineal de expansión térmica* mide la dilatación de un material en una sola dimensión. Para cambios relativamente pequeños de temperatura, la expansión lineal es proporcional a la diferencia de temperaturas inicial (T_i) y final (T) del material.

En la fig. 12.6, la barra rectangular tiene, a una temperatura inicial T_i , una longitud L_i . Cuando la temperatura se incrementa un valor $\Delta T = T - T_i$, la barra se expande linealmente. La diferencia de longitud es:

$$\Delta L = L - L_i$$

El cambio de longitud, con respecto a la longitud inicial, está relacionado con el cambio de temperatura mediante la fórmula:

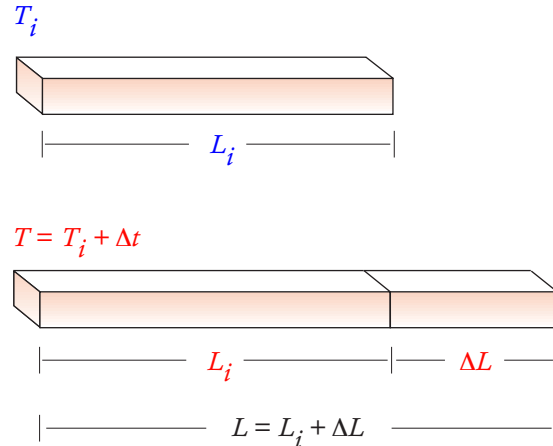


Fig. 12.6 Dilatación lineal.

$$\frac{\Delta L}{L_i} = \alpha \Delta T \quad \Rightarrow \quad \frac{L - L_i}{L_i} = \alpha (T - T_i) \quad (12.3)$$

donde α es el *coeficiente térmico de expansión lineal*. Si despejamos el valor de ΔL en (12.3):

$$\frac{L - L_i}{L_i} = \alpha \Delta T \quad \Rightarrow \quad L - L_i = \alpha L_i \Delta T$$

Despejando L :

$$L = L_i + \alpha L_i \Delta T = L_i (1 + \alpha \Delta T) \quad (12.4)$$

α se expresa en unidades inversas de temperatura, $1/^\circ\text{C}$ o $1/^\circ\text{F}$. La tabla 12.1 muestra valores de α para algunos materiales a 20°C .

Tabla 12.1 Coeficiente térmico de expansión lineal ($1/^\circ\text{C}$) para algunos materiales a 20°C .

Material	Coeficiente Expansión Lineal (α)
Hierro	$12 \cdot 10^{-6}$
Aluminio	$24 \cdot 10^{-6}$
Cobre	$17 \cdot 10^{-6}$
Concreto	$12 \cdot 10^{-6}$
Vidrio	$9 \cdot 10^{-6}$
Acero	$12 \cdot 10^{-6}$

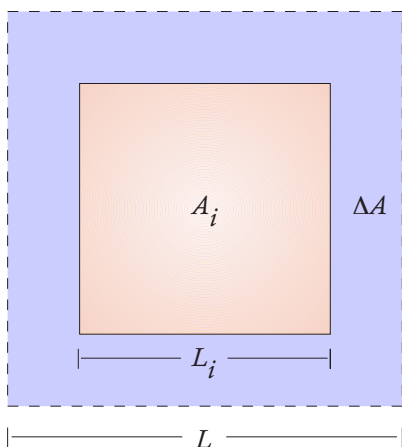


Fig. 12.7 Expansión superficial.

Si ahora consideramos una lámina cuadrada de lado L_i y suponemos que se dilata con el mismo coeficiente de expansión lineal en sus dos direcciones, (fig. 12.7), el área de la lámina dilatada puede escribirse como:

$$A = L^2$$

Usando la relación (12.4):

$$A = [L_i(1 + \alpha\Delta T)]^2$$

Desarrollando la expresión anterior:

$$A = L_i^2(1 + \alpha\Delta T)^2 = L_i^2[1 + 2\alpha\Delta T + \alpha^2(\Delta T)^2]$$

De la tabla 12.1 observamos que los valores de α son muy pequeños, del orden de 10^{-6} , por lo que α^2 es mucho más pequeño, del orden de 10^{-12} . Este valor, entonces, puede despreciarse, por lo que podemos escribir:

$$A = L_i^2(1 + 2\alpha\Delta T)$$

Como $L_i^2 = A_i$, finalmente obtenemos:

$$A = A_i(1 + 2\alpha\Delta T) \quad (12.5)$$

El valor 2α corresponde al *coeficiente térmico de expansión superficial* y su valor es el doble del coeficiente lineal.

De una forma similar, puede demostrarse que, en el caso de una dilatación volumétrica, el volumen final de un objeto está dado por:

$$V = V_i(1 + 3\alpha\Delta T) \quad (12.6)$$

donde 3α es el *coeficiente térmico de expansión volumétrica*.

Ejemplo 12.2

Una viga doble T de acero de 12 m de largo está a 20°C y se calienta a una temperatura de 40°C . ¿Cuál es el incremento en la longitud de la viga?

Solución

De acuerdo a la relación (12.3):

$$\Delta L = L_i \alpha \Delta T$$

Según el planteamiento del ejemplo y la tabla 12.1:

$$L_i = 12 \text{ m} \quad T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad T = 40 \text{ }^\circ\text{C} \quad \alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$$

Sustituyendo valores:

$$\Delta L = 12 \text{ m} \cdot 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}} (40 - 20) \text{ }^\circ\text{C} = 12 \cdot 12 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$\Delta L = 2.880 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad \Rightarrow \quad \Delta L = 2,88 \text{ mm}$$

El incremento en longitud, aunque es muy pequeño, puede tener un efecto importante si la viga está severamente restringida en sus extremos.

Ejemplo 12.3

Una lámina circular de aluminio tiene un radio de 10 cm a 25 °C. ¿A qué temperatura habrá que calentarse para que su radio se incremente 0,1 cm?

Solución

Se tienen los siguientes datos:

$$r_i = 10 \text{ cm} \quad \alpha = 24 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad r = 10,1 \text{ cm} \quad T_i = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

De acuerdo con (12.5):

$$A = A_i (1 + 2\alpha \Delta T) \quad \Rightarrow \quad \frac{A}{A_i} = 1 + 2\alpha \Delta T \quad \Rightarrow \quad \Delta T = \frac{\frac{A}{A_i} - 1}{2\alpha}$$

Los valores de A_i y A son:

$$A_i = \pi r_i^2 = \pi \cdot 10^2 \quad \Rightarrow \quad A_i = 100\pi \text{ cm}^2$$

$$A = \pi r^2 = \pi \cdot 10,1^2 \quad \Rightarrow \quad A = 102,1\pi \text{ cm}^2$$

Entonces:

$$\Delta T = \frac{\frac{102,01\pi}{100\pi} - 1}{2 \cdot 24 \cdot 10^{-6}} = \frac{0,0201}{48} \cdot 10^6 = 0,00041875 \cdot 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} = 418,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Como $\Delta T = T - T_i$ y $T_i = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$T - T_i = 418,75 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow T = 25 \text{ } ^\circ\text{C} + 418,75 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow T = 443,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

12.5 EXPANSIÓN DEL AGUA

Normalmente, las sustancias se expanden cuando aumenta la temperatura y se comprimen cuando ésta baja. Sin embargo, el agua, sustancia fundamental para la vida, presenta un comportamiento anómalo cerca de su punto de congelación. En la fig 12.8 se muestra cómo varía el volumen del agua con la temperatura. Si, a partir de $100 \text{ } ^\circ\text{C}$, se baja la temperatura, el volumen se hace más pequeño, y su valor desciende hasta que la temperatura alcanza un valor de $4 \text{ } ^\circ\text{C}$. A partir de allí (volumen V_1), el volumen se incrementa y en $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ se alcanza un volumen V_2 que es mayor que V_1 . Como aumenta el volumen, la densidad ($d = m/V$) del agua disminuye y, por lo tanto, el hielo resultante puede flotar sobre el agua en estado líquido. Esta es la causa por la cual el hielo flota en el agua.

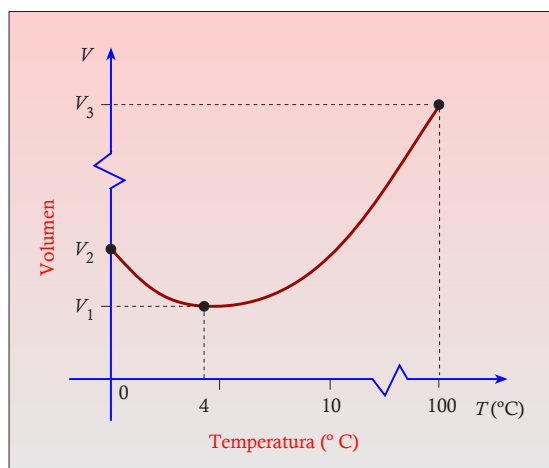
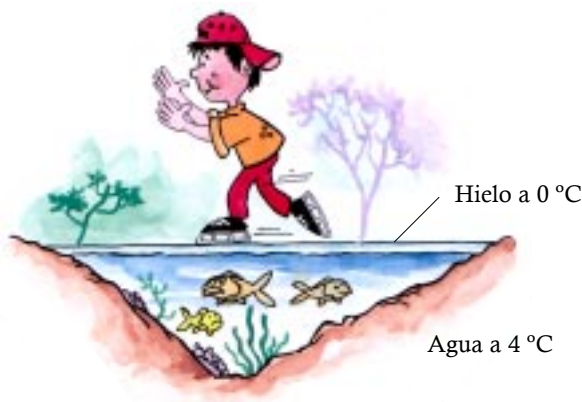


Fig. 12.8 Expansión térmica del agua.

La mencionada propiedad del agua ayuda a preservar la fauna y la flora en aquellas regiones donde tienen lugar temperaturas muy bajas. En esas zonas, los ríos y lagos se congelan solamente en la superficie. El hielo así formado, se queda en la parte superior del cuerpo de agua, por poseer menos densidad que el agua que queda por debajo de la superficie y la cual está a $4 \text{ } ^\circ\text{C}$.

El comportamiento anómalo del agua permite preservar la vida de animales y vegetales en las regiones de clima muy frío. El agua, al congelarse a 0°C , forma hielo, que por ser más liviano que el agua líquida, asciende a la superficie. El agua por debajo de la capa de hielo se mantiene a 4°C .



PIENSA Y EXPLICA



- 12.24** ¿Qué es la expansión térmica y por qué se produce?
- 12.25** ¿Qué importancia tienen las juntas de dilatación en la construcción de un piso? ¿Qué sucede cuando no se dejan estas juntas?
- 12.26** A menudo, cuando la tapa de un frasco está muy apretada, es posible aflojarla calentándola. Explica por qué.
- 12.27** ¿Qué es el coeficiente térmico de expansión lineal? ¿En qué unidades se expresa?
- 12.28** Escribe la relación que permite determinar el cambio de longitud de un objeto cuando se incrementa la temperatura.
- 12.29** Cuando la temperatura aumenta, ¿qué se expande más: un sólido, un líquido o un gas? Explica por qué.
- 12.30** Una lámina de hierro, con un agujero de diámetro $d = 2\text{ cm}$, se calienta para que una moneda de $2,1\text{ cm}$ se coloque en el mismo. ¿Es correcto el procedimiento? ¿El agujero aumentará o disminuirá de diámetro?
- 12.31** Dos barras metálicas de igual longitud se calientan a la misma temperatura. La expansión lineal resulta distinta. ¿Qué puedes decir al respecto?



Piensa y explica 12.30.



Piensa y explica 12.32.

- 12.32** Dos vasos, fabricados con el mismo tipo de vidrio , se llenan total y parcialmente de agua caliente . El primero se rompe , mientras que el otro no. ¿Cómo explicas esto?
- 12.33** ¿A qué se debe el ruido que se produce cuando se echa agua a temperatura ambiente a una cubeta de hielo?
- 12.34** ¿Por qué se dice que el agua tiene un comportamiento anómalo cuando la temperatura está por debajo de 4°C ?
- 12.35** ¿Cuál es la causa por la cual una botella de agua puede romperse si se coloca en el congelador?
- 12.36** ¿Por qué el hielo flota en el agua?
- 12.37** Explica la importancia del aumento de volumen del agua a 0°C para la preservación de la vida en las regiones de clima frío.



PROBLEMAS

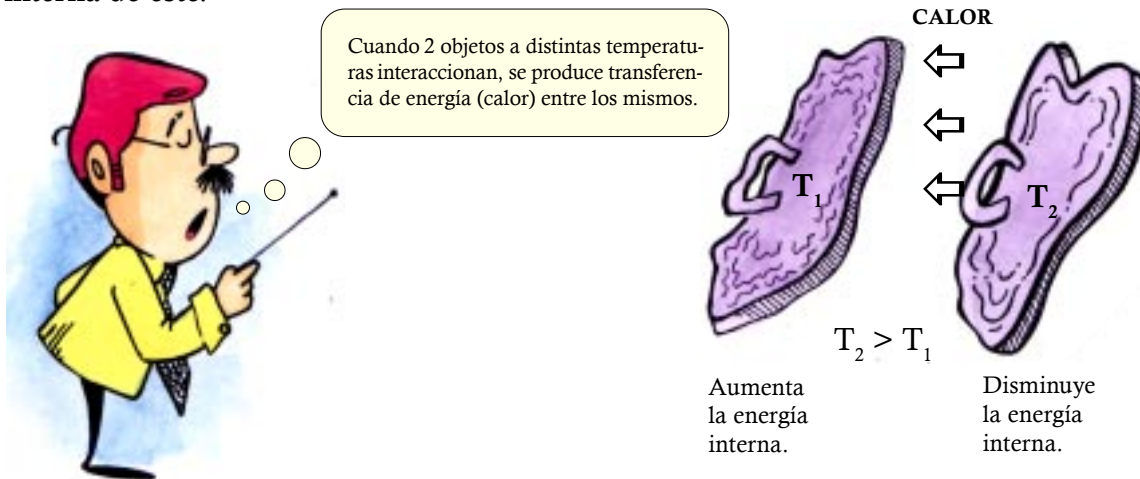


- 12.7** Una varilla de aluminio tiene una longitud de 1 m a una temperatura de 25°C . Si se aumenta la temperatura a 100°C , ¿cuánto cambia la longitud del alambre?
- 12.8** Una placa circular de hierro de $0,5\text{ m}^2$ a 25°C se calienta a una temperatura de 150°C . ¿Cuánto aumenta su superficie?
- 12.9** Una varilla de cobre de 50 cm a 25°C experimenta un cambio de longitud de 1 mm, al aumentar su temperatura. ¿Qué valor alcanzó la temperatura final?

- 12.10** Un patio se pavimentó usando cuadros de concreto de 1 m de lado. Entre un cuadro y otro se dejan juntas de dilatación de 5 mm de ancho. La temperatura durante la noche baja hasta 10°C y en el día alcanza 60°C en el concreto. ¿Se agrietará el piso con el cambio de temperatura?
- 12.11** Una esfera de 10 cm de radio aumenta su volumen en $0,01\text{ cm}^3$, cuando la temperatura varía 50°C . ¿Cuál es el coeficiente térmico de expansión cúbica del material de la esfera?

12.6 MEDIDA DEL CALOR

Ya vimos que el término calor sólo debe utilizarse para designar *energía en transición*, transferida de un objeto a otro, debido a la diferencia de temperatura entre los mismos. Cuando se transfiere calor a un objeto se incrementa la energía interna del mismo, lo que a la vez trae consigo un aumento de temperatura. Las expresiones "el calor de un objeto" o "un cuerpo tiene calor porque su temperatura es alta" no son exactas desde el punto de vista de la Física. Más bien, hay que enfatizar lo que ya hemos estudiado sobre la energía interna de un objeto: la temperatura aumenta a medida que la energía interna se incrementa. Si la temperatura de un objeto es mayor que la de otro, es porque aquél tiene mayor energía interna. Si estos objetos entran en contacto habrá transferencia de energía del uno al otro: del que tiene más alta temperatura al que tiene menor temperatura. *A esa transferencia de energía es lo que se denomina calor*. Es necesario mencionar, también, que un cuerpo puede aumentar su energía interna y, por tanto, su temperatura, aun cuando no haya transferencia de energía en forma de calor. Por ejemplo, cuando las aspas de una batidora se mueven para agitar una sustancia líquida, la energía cinética de las mismas origina un aumento de temperatura en el seno del líquido, al incrementarse la energía interna de éste.



La cantidad de energía transferida (calor) a una sustancia u objeto puede ser determinada midiendo el cambio de temperatura experimentada por una cantidad conocida de masa de la sustancia que absorbe el calor. Tradicionalmente, se ha tomado al agua como sustancia patrón para medir esa absorción. Sin embargo, es necesario puntualizar que el calor transferido depende tanto de la masa como de la naturaleza de la sustancia involucrada en el proceso.

Como el calor es energía, es obvio que debe medirse en joules, unidad internacional (SI) para medir trabajo o energía. Sin embargo, en la práctica es común utilizar como unidad de calor *la caloría*, unidad que tiene su origen en la teoría del calórico, sustancia que se supuso, erróneamente, responsable del aumento de la temperatura de los cuerpos:



La caloría se define como el calor necesario para aumentar en 1°C la temperatura de 1 g de agua.

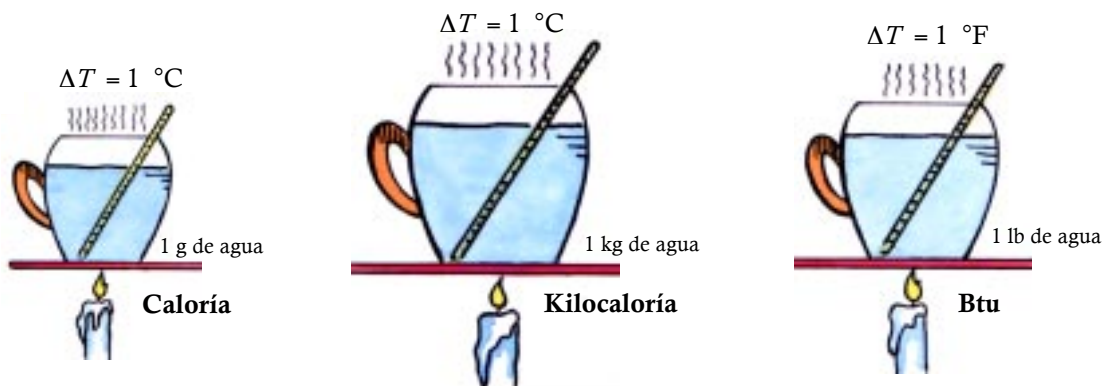
Una unidad más grande es la *kilocaloría*, que es el *calor necesario para aumentar en 1°C la temperatura de 1 kg de agua*. ($1\text{ kcal} = 1.000\text{ cal}$). Industrialmente, se emplea la llamada *unidad térmica británica*, btu ("British Thermal Unit"):

Una unidad térmica británica (btu) es la cantidad de calor necesaria para elevar en 1°F la temperatura de 1 libra de agua.



Los acondicionadores de aire vienen marcados en sus placas con valores típicos que van desde 12.000 btu hasta 30.000 btu. En realidad, estos valores corresponden a btu por hora y establecen la cantidad de calor transferida por la unidad acondicionadora durante ese tiempo.

El valor energético de los alimentos (¿les recuerda algo sobre las dietas?) se especifica en kilocalorías, aun cuando es usual utilizar el término calorías para designarlo. En este caso, la Caloría (con mayúscula) corresponde a kilocalorías. Así, cuando se dice que un helado de chocolate contiene 400 Calorías, en realidad nos estamos refiriendo a 400 kilocalorías o 400.000 calorías.



- a) Una caloría aumenta en 1 °C la temperatura de 1 g de agua.
 b) Una kilocaloría aumenta en 1 °C la temperatura de 1 kg de agua.
 c) Una btu aumenta en 1 °F la temperatura de 1 lb de agua.



Existe una relación entre trabajo mecánico y calor que determina una equivalencia entre las unidades de calorías y joules. James Joule, científico inglés, demostró que cuando se hace girar una rueda de paletas en el interior de un recipiente lleno de agua y aislado térmicamente, por cada 4,19 J de trabajo la temperatura del agua se eleva 1 °C por gramo, lo que significa que:

$$1 \text{ cal} = 4,19 \text{ J}$$

$$1 \text{ kcal} = 4190 \text{ J}$$

12.7 TRANSFERENCIA DE CALOR

Cuando dos objetos de distintas temperaturas se aproximan, la transferencia de energía siempre se produce del objeto más caliente al más frío. Este intercambio de energía continúa hasta que se alcanza un estado de equilibrio térmico, donde las temperaturas se igualan. El calor fluye de un objeto a otro mediante tres mecanismos distintos: *conducción*, *convección* y *radiación*.

Conducción: si se calienta una varilla metálica mediante una llama colocada en uno de sus extremos, llegará un momento en el cual la temperatura aumentará en el otro extremo (fig. 12.9).

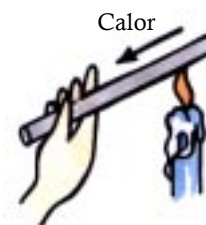


Fig. 12.9 El calor se transfiere por conducción a lo largo de la varilla metálica.

Los metales como la plata, el cobre, el aluminio y el hierro son buenos conductores del calor. La conducción de calor se produce por la colisión entre átomos y moléculas de los materiales sometidos a calentamiento y, también, por la acción de los electrones libres.

En la varilla metálica de la fig. 12.9, la llama transfiere calor (energía) a uno de sus extremos, haciendo que los átomos se exciten y vibren más rápidamente. Esta vibración es transmitida a los átomos vecinos y, así, hasta alcanzar el otro extremo de la varilla. En este proceso, el papel de los electrones libres, no unidos a los átomos, es fundamental. Éstos se mueven aleatoriamente a través del metal, provocando colisiones con otros átomos y otros electrones libres, lo cual incrementa la transferencia de calor. Debido a la presencia de muchos electrones libres en su estructura, los metales son buenos conductores del calor y de la electricidad. Cuando esta acción alcanza el extremo de la varilla, se produce una acción similar en la mano de quien sostiene la varilla, dando lugar a la sensación de calor.

Al contrario de los metales, existen materiales como la madera, las telas, el papel y compuestos de poliestireno, que son malos conductores del calor. Son, en mayor o menor grado, aislantes térmicos, porque no permiten fácilmente la transferencia de calor. Los líquidos y los gases son buenos aislantes térmicos. El aire, una mezcla de gases, es, también, un buen aislante térmico. De hecho, algunos materiales como la madera, las pieles y otros compuestos porosos son buenos aislantes, por poseer pequeñas bolsas de aire en su estructura.

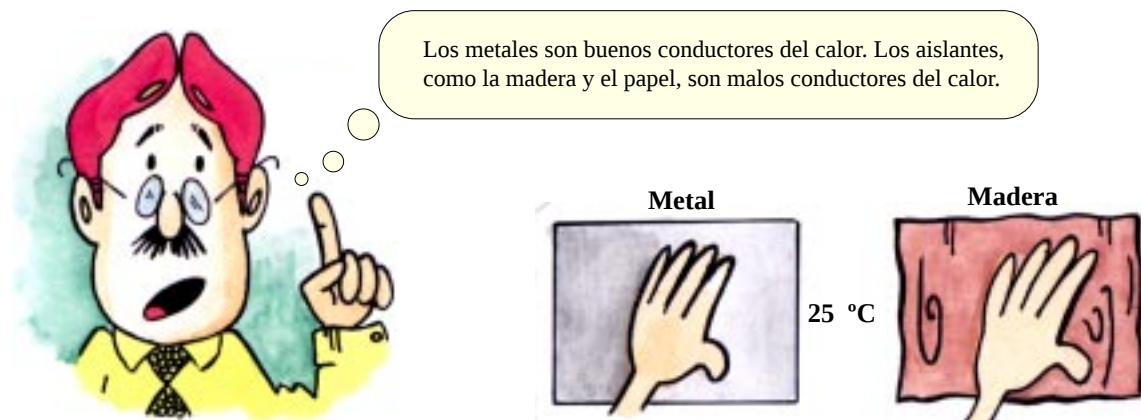


Fig. 12.10 Aun cuando el metal y la madera están a la misma temperatura ambiente, al tocarlos, el metal se siente más frío que la madera.

Un ejemplo elocuente de la diferencia entre un buen conductor y un aislante se muestra en la fig. 12.10. Normalmente, la temperatura del cuerpo humano está alrededor de 36 °C, valor que, en la mayoría de los casos, está por encima del valor de la temperatura del medio ambiente. Si el ambiente donde se encuentran los pedazos de metal y de madera

de la fig. 12.10 tiene una temperatura de 25°C , ambos objetos, por efecto del equilibrio térmico, alcanzan la misma temperatura. Si se tocan el metal y la madera, el primero parece, sin embargo, estar más frío que esta última. Esto se explica porque el calor del cuerpo se transfiere más rápidamente al metal, por ser éste un buen conductor. Este proceso es más lento en el caso de la lámina de madera.

Convección: cuando el calor se transmite por conducción, la energía se propaga de una molécula a otra, sin que se produzca desplazamiento de las mismas. Las moléculas son excitadas, sin que varíe su posición en el espacio. Otro mecanismo de transmisión del calor que se manifiesta en líquidos y gases, implica el desplazamiento de la sustancia involucrada en el calentamiento. Tal mecanismo se denomina *convección*. La transmisión de calor por convección implica la transferencia de masa entre puntos que están a distintas temperaturas.

Aun cuando los líquidos y los gases no son buenos conductores del calor, la movilidad de sus moléculas facilita la transmisión de calor por convección.

Los vientos en la atmósfera terrestre se originan por corrientes de convección, tal como se indica en la fig. 12.11. En un lugar cercano a la playa, durante el día, la temperatura del agua es menor que la de la playa, por lo que el aire alrededor de esta última se calienta, baja de densidad y asciende hacia capas superiores. El aire más frío del mar ocupa el lugar del aire de la playa y así sucesivamente. El ciclo se repite durante el día, originando vientos que van desde el mar hacia la playa. Durante la noche el aire de la playa se enfría más rápidamente que el que está sobre el mar y el proceso se invierte. La brisa sopla entonces desde la playa hacia el mar.

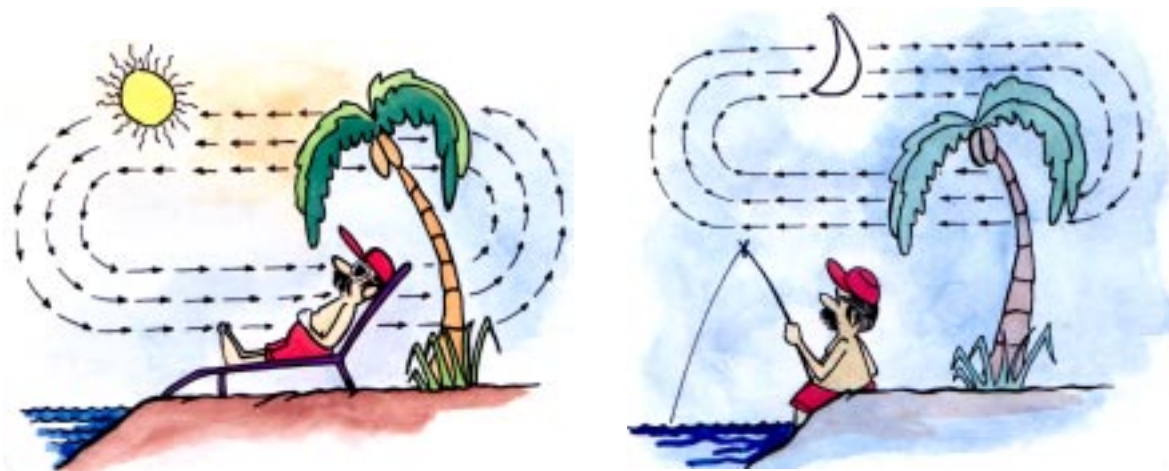


Fig. 12.11 Las corrientes de convección se producen por diferencia de calentamiento entre zonas distintas de la superficie terrestre. Esto origina los vientos que, en lugares cercanos a la playa, van desde el mar hacia la playa durante el día y en dirección contraria durante la noche.



Fig. 12.12 Transmisión de calor por convección en un líquido.

La fig. 12.12 muestra la forma como se transfiere el calor por convección en los líquidos. Cuando se calienta agua en un recipiente mediante una llama, la parte inferior del mismo recibe calor por conducción: la llama calienta el recipiente y éste a su vez calienta el agua del fondo. El agua, al calentarse, aumenta su volumen y, por lo tanto, su densidad disminuye ($d = m/V$), por lo cual se desplaza hacia la parte superior del recipiente. El espacio dejado por el agua caliente es ocupado por el agua más fría y más densa de la parte superior. El ciclo se repite, creándose las llamadas *corrientes de convección* que son las responsables del calentamiento del agua dentro del recipiente.

Otro ejemplo de cómo se manifiesta la transferencia de calor por convección se muestra en una forma sencilla en la fig 12.13. Cuando la mano se coloca alrededor de la llama de la vela, el calor que se siente es relativamente pequeño. Sin embargo, cuando la mano se coloca por encima de la llama, el calor que se siente es intenso. La explicación es la siguiente: el aire que rodea la llama, sube al calentarse y el espacio que deja es ocupado por aire más frío de las capas superiores. Estas corrientes de convección hacen que el calor se transmita verticalmente y que se sienta más el efecto encima de la llama que a su lado.

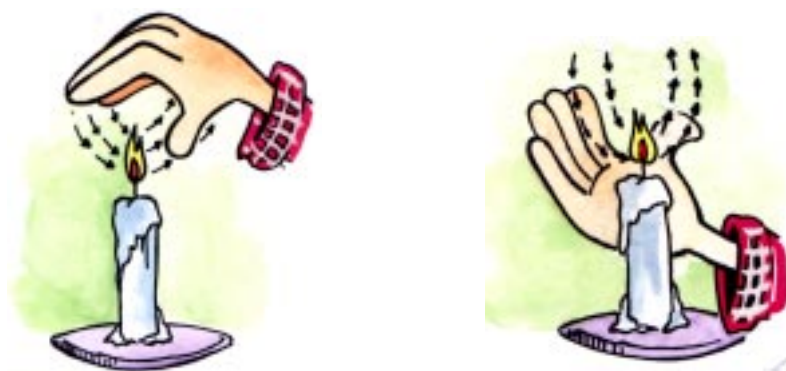


Fig. 12.13 El aire, al calentarse, sube por convección haciendo que se sienta mucho más caliente la mano colocada arriba de la llama que la que está al lado de la misma.

Radiación: ya vimos que el calor podía transmitirse por excitación de las moléculas de una sustancia, sin movimiento neto de la misma (conducción) o mediante el desplazamiento de masas de líquidos o gases (convección). En ambos casos, es necesario un medio material para la transferencia de calor.

Consideremos ahora un objeto caliente, tal como un bombillo eléctrico colocado en el interior de un recipiente de vidrio al cual se le ha hecho el vacío (fig. 12.14). En este caso,

no hay un medio material para la transferencia de calor y, sin embargo, si se toca el recipiente externamente se notará que está caliente. Como esta transferencia no pudo haberse efectuado por conducción o por convección, puesto que las mismas necesitan de un medio material, se dice que la transmisión se produjo mediante un fenómeno conocido como *radiación térmica*.

La radiación térmica es uno de los tipos de *energía radiante*, que comprenden la radiación infrarroja, las ondas de radio, las microondas, la luz visible, la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. La energía radiante se trasmite en la forma de *ondas electromagnéticas*.

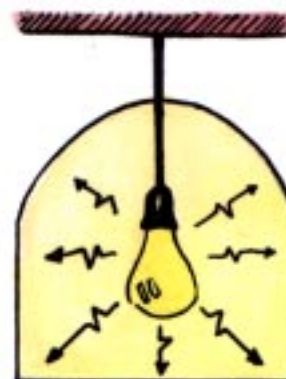


Fig. 12.14 El calor de la fuente incandescente, encerrada en un recipiente al vacío, se transfiere por radiación.

Todos los objetos emiten energía radiante, en una mezcla de ondas electromagnéticas que incluye los tipos de ondas mencionadas anteriormente. De esas ondas, la radiación térmica se propaga como *radiación infrarroja*. Son estas ondas las que producen una sensación de calor, cuando son absorbidas por la piel y provocan la vibración de las moléculas de agua presentes en la superficie del cuerpo humano. Esta vibración aumenta la energía interna de dichas moléculas.

Cuando se está cercano a una llama, el calor que se siente proviene, fundamentalmente, del efecto radiante, ya que el aire que se calienta por convección tiende a subir hacia capas más altas, mediante el fenómeno ya discutido. El calor que el Sol transfiere a la Tierra tiene lugar mediante radiación, puesto que no existe un medio material a lo largo del extenso camino entre esos dos cuerpos celestes. Este mecanismo de transmisión de calor por radiación, permite la existencia de vida en nuestro planeta, mediante el llamado efecto invernadero.



PIENSA Y EXPLICA



12.38 ¿Qué es calor?

12.39 ¿Qué unidades se utilizan para medir el calor?

- 12.40** Define la caloría, la kilocaloría y la unidad térmica británica (btu).
- 12.41** ¿Cuál es la equivalencia entre joules y calorías?
- 12.42** ¿Por qué no es correcta la expresión “un cuerpo tiene calor”?
- 12.43** ¿A qué se denomina equivalente mecánico del calor?
- 12.44** Cita materiales que sean buenos y malos conductores del calor.
- 12.45** ¿Por qué los metales son buenos conductores de calor?
- 12.46** ¿Por qué al tocar un pedazo de metal y otro de madera, que está a la misma temperatura, el metal parece estar más frío?
- 12.47** ¿Cuáles son los mecanismos mediante los cuales puede transferirse calor de un objeto a otro?
- 12.48** ¿Cómo se transmite el calor por conducción?
- 12.49** Cita algunos materiales que sean aislantes térmicos.
- 12.50** Se introduce una barra metálica en un recipiente que contiene hielo picado y, al poco tiempo, la mano que sostiene la barra se siente fría. ¿Se produjo transferencia de calor desde el hielo hacia la mano?
- 12.51** Cuando un ave siente frío, eriza sus plumas y así mantiene su temperatura interna. ¿Cuál es el truco que usa?
- 12.52** ¿Por qué las lámparas de mesa tienen un agujero arriba de la pantalla que cubre al bombillo?



Piensa y explica 12.50.



Piensa y explica 12.51.



Piensa y explica 12.52.

- 12.53** Explica el mecanismo de transferencia de calor por convección. ¿Cuál es la diferencia con la transferencia de calor por conducción?
- 12.54** ¿En cuáles sustancias se transmite el calor por convección?
- 12.55** ¿Qué son corrientes de convección? ¿Cómo se producen?
- 12.56** Explica cómo las corrientes de convección originan los vientos. Haz referencia a la fig. 12.11.
- 12.57** Explica por qué se siente más calor al colocar la mano por encima de una llama que al lado de la misma. Haz referencia a la fig. 12.13.
- 12.58** ¿Por qué una cobija evita que una persona sienta frío?
- 12.59** Explica el mecanismo mediante el cual el calor se transmite por radiación. ¿Cuál es la diferencia respecto a la transferencia de calor por conducción y convección?
- 12.60** ¿Cómo se transmite la energía radiante?
- 12.61** ¿A qué tipo de radiación corresponde la radiación térmica?
- 12.62** ¿Por qué podemos afirmar que el calor del Sol se transmite por radiación?
- 12.63** ¿Por qué en días calurosos es más conveniente usar ropa blanca?

12.8 CALOR ESPECÍFICO

Cuando se suministra calor a un objeto, la energía interna del mismo se incrementa, originando tanto un incremento de temperatura, como un aumento de la energía potencial asociada con las fuerzas intermoleculares. Sin embargo, es significativo el hecho que cantidades iguales de calor aplicadas a objetos de igual masa, pero de naturaleza distinta, originan diferentes cambios de temperatura. Esto tiene que ver con las distintas estructuras moleculares de la materia.

Supongamos que, manteniendo la llama por un mismo intervalo de tiempo en la fig.

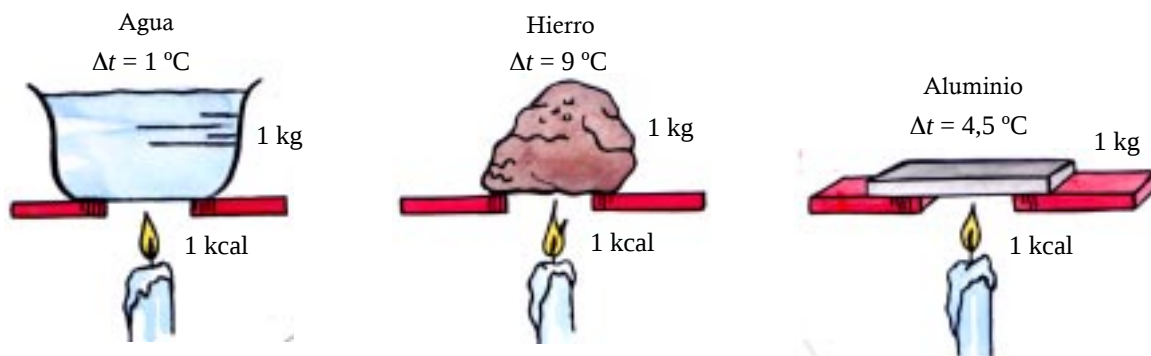


Fig. 12.15 Materiales distintos absorben el calor de acuerdo a la naturaleza molecular de sus estructuras. Si se suministra 1 kcal a la misma masa (1 kg) de agua, aluminio y hierro, este último se calienta más que el aluminio que, a su vez, se calienta más que el agua.

12.15, se suministra 1 kcal de calor a masas de 1 kg de agua, hierro y aluminio. Bajo las mismas condiciones, la temperatura del agua se elevará en $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, la del hierro en $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la del aluminio en $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es decir, cada uno de estos materiales responde de manera distinta, según su estructura molecular.

Consideremos ahora cantidades distintas de una misma sustancia; por ejemplo, agua. Como se muestra en la fig. 12.16, si se suministra 1 kcal a 1 litro de agua, la temperatura sube $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que si se trata de 2 litros de agua, la temperatura sube $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto indica que, a mayor masa, el incremento de temperatura es menor para la misma cantidad de calor.

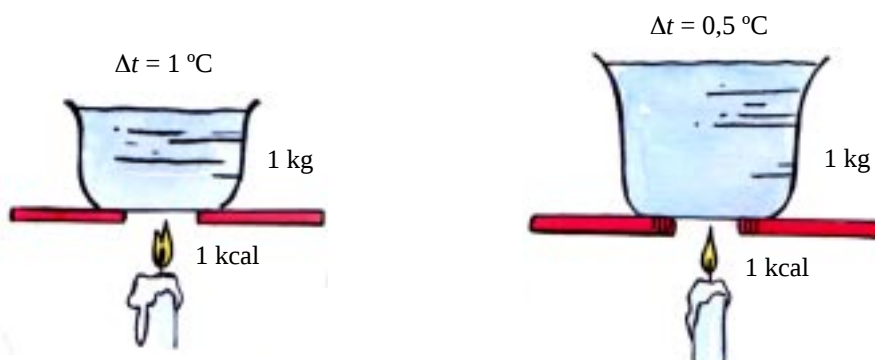


Fig. 12.16 El incremento de temperatura depende de la masa a calentar.

En conclusión: el incremento de temperatura depende de la naturaleza de la sustancia, de la masa presente en el proceso y de la cantidad de calor suministrada. Lo anterior puede relacionarse mediante la expresión:

$$Q = mc\Delta T$$

(12.7)

Donde:

- Q : Cantidad de calor suministrada
 ΔT : Cambio de temperatura
 c : Capacidad calórica específica o calor específico

La *capacidad calórica específica* o, simplemente, *calor específico*, es una propiedad característica de cada sustancia y está determinada por los enlaces moleculares de la misma.



El calor específico es la cantidad de energía necesaria para elevar en 1 °C la temperatura de 1 kg de una sustancia.

Si de la relación (12.7) se despeja c , obtenemos:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (12.8)$$

Si Q se expresa en kcal, m en kg y ΔT en °C, la unidad de calor específico está dada en kcal/kg - °C. Si Q se expresa en joules, el calor específico está dado en J/kg - °C. En la tabla 12.2 se dan los calores específicos de algunas sustancias.

Calor Específico					
Sustancia	J/kg - °C	Kcal/kg - °C	Sustancia	J/kg - °C	Kcal/kg - °C
Agua	4.190	1,00	Cobre	390	0,093
Aire	1.050	0,25	Vidrio	840	0,20
Hierro	460	0,11	Mercurio	140	0,033
Aluminio	920	0,22	Plata	234	0,056

Tabla 12.2 Calores específicos de algunas sustancias a 25 °C y presión atmosférica.

En cierta forma, el calor específico puede ser concebido como una inercia térmica. Así, como la inercia mecánica se define como la resistencia de un objeto a cambiar su estado de movimiento, *la inercia térmica es la resistencia de una sustancia a cambiar su temperatura.*

Como puede observarse en la tabla 12.2, el agua es una sustancia de elevado calor específico. Esto significa que tiene mayor capacidad que muchas de las sustancias comunes para absorber energía o para cederla. Se necesita una cantidad de agua relativamente pequeña para absorber una gran cantidad de calor, con un incremento pequeño de temperatura. Por esta razón, el agua se utiliza frecuentemente en el enfriamiento de motores y en otros procesos industriales. Una vez calentada, el agua tarda un tiempo relativamente largo en enfriarse, por lo que es utilizada para mantener la temperatura alta por períodos prolongados.

Ejemplo 12.4

Determina la cantidad de calorías necesarias para incrementar la temperatura de 1 litro de agua a 40 °C.

Solución

De acuerdo a la relación (12.7), $Q = mc \Delta T$. Como $m = 1 \text{ kg}$, $c = 1 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ (de tabla 12.2) y $\Delta T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$Q = 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 40 \text{ }^\circ\text{C} = 40 \text{ kcal}$$

Es decir, se necesitan 40.000 cal para elevar la temperatura 40 °C.

Ejemplo 12.5

Se suministran 20.000 cal a una lámina de hierro y a una de cobre, ambas de masa 2 kg. Si la temperatura inicial de las láminas es de 40 °C, ¿qué temperatura alcanzan?

Solución

Los calores específicos para el hierro y el aluminio son:

$$c_{Fe} = 0,11 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$c_{Cu} = 0,093 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

De acuerdo a (12.7):

$$Q = mc\Delta T \quad \Rightarrow \quad \Delta T = \frac{Q}{mc}$$

Para el hierro se tiene ($20.000 \text{ cal} = 20 \text{ kcal}$)

$$\Delta T = \frac{20 \text{ kcal}}{2 \text{ kg} \cdot 0,11 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}} = 90,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Si llamamos T_f a la temperatura final y T_i a la temperatura inicial, tendremos:

$$\Delta T = T_f - T_i = 90,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Como $T_i = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$, la temperatura final es:

$$T_f = T_i + 90,9 = 40 + 90,9 = 130,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para el cobre:

$$\Delta T = \frac{20 \text{ kcal}}{2 \text{ kg} \cdot 0,093 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}} = 107,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Luego:

$$T_f = 40 + 107,5 = 147,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Lo que indica que el cobre aumenta más su temperatura. Podemos afirmar, entonces, que su inercia térmica es menor con relación a la del hierro.

Cuando se mezclan o se ponen en contacto dos sustancias, se produce un intercambio de calor entre las mismas, hasta lograrse un equilibrio térmico. El cuerpo más caliente cede calor, mientras que el más frío lo absorbe, hasta que alcanzan la misma temperatura.



Ejemplo 12.6

Un envase contiene 10 litros de agua a una temperatura de 20 °C. Si dentro del mismo se coloca un pedazo de hierro de 1 kg, que previamente se ha calentado a una temperatura de 200 °C, ¿cuál es la temperatura de equilibrio del conjunto, si asumimos que el envase no pierde ni recibe calor?

Solución

El agua absorbe calor por encontrarse a una temperatura menor que la del pedazo de hierro. Por el contrario, el hierro pierde calor y su temperatura baja. Después de cierto tiempo, ambas sustancias se equilibran, alcanzando la misma temperatura T . El calor absorbido por el agua es:

$$Q_A = m_a \cdot c_A \cdot (T - 20 \text{ °C})$$

Donde,

$$m_A = \text{masa del agua} = 10 \text{ kg}$$

$$c_A = \text{calor específico del agua} = 1 \text{ kcal/kg} \cdot \text{°C}$$

$$T = \text{temperatura final del sistema}$$

Sustituyendo valores y operando:

$$Q_A = 10 \cdot 1 \cdot (T - 20) \Rightarrow Q_A = 10T - 200$$

El calor cedido por el pedazo de hierro, Q_H , está dado por:

$$Q_H = m_H \cdot c_H \cdot (200 \text{ °C} - T)$$

(¿Por qué se ha usado $200 \text{ °C} - T$, en lugar de $T - 200 \text{ °C}$?). Como $m_H = 1 \text{ kg}$ y $c_H = 0,11 \text{ kcal/kg} \cdot \text{°C}$, se tiene:

$$Q_H = 1 \cdot 0,11 \cdot (200 - T) \Rightarrow Q_H = 22 - 0,11T$$

Si no hay absorción o pérdida de calor hacia el exterior del envase, $Q_A = Q_H$ y entonces:

$$10T - 200 = 22 - 0,11T \Rightarrow 10T + 0,11T = 200 + 22$$

$$10,11T = 222 \Rightarrow T = \frac{222}{10,11} \Rightarrow T \approx 22 \text{ °C}$$

Es decir, la temperatura del agua aumenta de 20 °C a 22 °C, mientras que la del pedazo de hierro baja de 200 °C a 22 °C.



PIENSA Y EXPLICA



- 12.64** ¿Por qué cuando se suministra igual cantidad de calor a objetos de igual masa, los cambios de temperatura son distintos?
- 12.65** ¿De qué depende el incremento de temperatura cuando se suministra calor a un cuerpo?
- 12.66** Escribe la fórmula que relaciona el calor suministrado a un cuerpo con su masa y el aumento de temperatura.
- 12.67** ¿Qué es el calor específico de una sustancia? ¿En qué unidades se expresa?
- 12.68** ¿Qué implicaciones tiene el decir que el agua tiene un alto calor específico?
- 12.69** Compara los calores específicos de las sustancias de la tabla 12.2 y di qué significan las diferencias entre un valor y otro.
- 12.70** ¿Por qué se dice que el calor específico corresponde a una inercia térmica?
- 12.71** ¿Qué tiene mayor calor específico, el agua del mar o la arena de la playa? ¿Qué significa esto, en términos de la absorción del calor?
- 12.72** Cuando se muerde un pastel caliente de manzana la parte interna puede causar quemaduras en la boca, contrario a lo que sucede con la parte externa. ¿Por qué esto es así?
- 12.73** En algunas explicaciones médicas se recomienda poner sobre algunas partes del cuerpo un objeto caliente. ¿Qué será más conveniente, un objeto metálico o una bolsa de agua?

**PROBLEMAS**

- 12.12** Con el fin de darse un baño, Anamary calienta unos 50 litros de agua a una temperatura de 20°C por encima de la temperatura ambiente. ¿Qué cantidad de calor debe emplear para calentar el agua?
- 12.13** Un bloque de hierro de 10 kg a una temperatura de 25°C se calienta hasta 200°C . ¿Qué cantidad de calor se le suministró? ¿Qué cantidad de calor liberaría, si su temperatura descendiera de 200°C a 0°C ?
- 12.14** Un pedazo de aluminio de 500 g se calienta a 100°C y luego se introduce en agua, produciéndose un descenso en su temperatura a 25°C . ¿Qué cantidad de calor cedió el aluminio al agua?
- 12.15** Se suministran 50.000 calorías a una barra de aluminio de 1 m de longitud. Si la barra tiene una masa de 1 kg y su temperatura inicial es de 25°C , a) ¿Qué temperatura alcanza la barra? b) ¿Cuál es su longitud final? c) ¿Cuál es su masa al terminar de calentar?
- 12.16** ¿Puede existir un valor negativo para el calor específico? Razona tu respuesta.
- 12.17** Se calienta un pedazo de cobre de 200 g a una temperatura de 150°C . Luego, se sumerge en 250 ml de agua, que está a 20°C . Si no hay pérdidas de calor hacia el exterior, determina la temperatura del cobre y la del agua, cuando alcanzan equilibrio térmico.
- 12.18** Se calientan 50 litros de agua hasta 80°C . Para bajar su temperatura a 40°C , se agrega agua a 18°C . ¿Qué cantidad de agua a 18°C debe utilizarse?

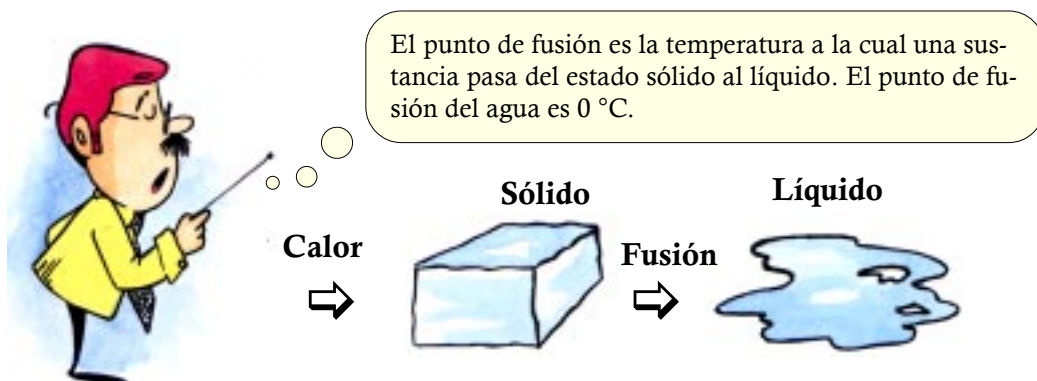
12.9 ESTADOS DE AGREGACIÓN DE LA MATERIA. CAMBIOS DE FASES.

La materia, comúnmente, se encuentra en tres estados o fases: *fase sólida*, *fase líquida* y *fase gaseosa*. Estos estados de las sustancias dependen de su energía interna.

Estado Sólido: en la fase sólida, los cuerpos tienen forma y volumen definidos por el arreglo interno de su estructura molecular. A temperatura ambiente, la mayoría de los metales son sólidos con estructuras cristalinas bien organizadas. Otros sólidos, como el vidrio, presentan estructuras amorfas, no cristalinas. En ambos casos, las moléculas del sólido se encuentran fuertemente atadas a la estructura interna y no hay desplazamiento significativo de las mismas.

Al suministrar calor a un sólido, se puede llegar a romper los enlaces intermoleculares, originando la conversión de la fase sólida a la líquida. La temperatura a la cual se produce este cambio de fase se denomina *punto de fusión*. Igualmente, un líquido puede pasar al estado sólido. La temperatura a la cual esto tiene lugar se llama *punto de solidificación o punto de congelación*. En este último caso, se extrae calor del líquido, se reduce el movimiento molecular y, por tanto, aumenta la fuerza de atracción entre las moléculas.

La solidificación del agua (su conversión a hielo) se produce cuando se extrae energía de la misma. Cuando se alcanza una temperatura de 0°C , a presión atmosférica, se produce el cambio del estado líquido al sólido. Si se añade sal al agua, se produce un descenso en la temperatura de solidificación, debido a la presencia de moléculas extrañas en la estructura molecular normal del agua. Esto tiene aplicación en el uso de anticongelantes.



Los sólidos cristalinos tienen puntos de fusión fijos. Por ejemplo, a presión atmosférica el plomo se funde a 327°C , la plata a 961°C y el mercurio a -39°C .

Durante la fusión, la temperatura del sólido permanece constante y es necesario suministrarle calor para que se produzca el cambio de fase. A la cantidad de calor que debe suministrarse por unidad de masa se le conoce como *calor latente de fusión* y es un valor caracte-

rístico para cada sustancia. El calor latente de fusión se designa por L_f . En la tabla 12.3 se indican el punto de fusión en $^{\circ}\text{C}$ y el calor latente de fusión en Kcal/kg de algunas sustancias, a la presión de 1 atmósfera.

Aun cuando los sólidos pasan al estado líquido sin antes pasar por el estado gaseoso, algunas sustancias, como la naftalina y el hielo seco, pasan directamente al estado gaseoso en un proceso conocido como *sublimación*.

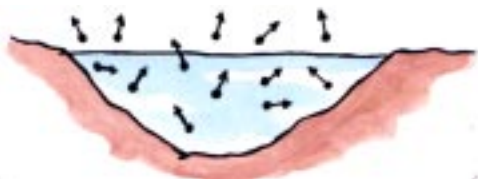
Tabla 12.3 Punto de fusión y calor latente de fusión para algunas sustancias a 1 atmósfera de presión.

Sustancia	Punto de Fusión ($^{\circ}\text{C}$)	Calor Latente de Fusión (Kcal/kg)
Agua	0	80
Plomo	328	5,9
Mercurio	- 39	2,8
Plata	961	21
Platino	1.775	27
Oro	1.063	15,4

Estado líquido: en los líquidos, la fuerza de cohesión de las moléculas es más débil que en los sólidos. Como consecuencia, hay una mayor movilidad de las moléculas que los conforman, lo que da origen a las características siguientes:

- Fluyen con notable facilidad.
- Adoptan la forma del recipiente que los contiene.
- No ofrecen gran resistencia a la penetración.

En general, los líquidos no presentan estructuras cristalinas ordenadas. Los llamados *cristales líquidos*, usados ampliamente en relojes y otros artefactos electrónicos, son una excepción a este comportamiento.



La evaporación se produce cuando algunas moléculas de la superficie alcanzan suficiente energía para escapar de su seno. Tiene lugar a cualquier temperatura.



Los líquidos pueden cambiar al estado gaseoso mediante dos mecanismos: *evaporación* y *ebullición*. En el caso de la evaporación, el cambio de fase líquida a gaseosa se produce lentamente, a cualquier temperatura. El mecanismo de evaporación es consecuencia del constante estado de agitación de las moléculas. Algunas de ellas alcanzan suficiente energía para escapar del seno del líquido pasando al estado gaseoso. La evaporación hace disminuir la temperatura del líquido, ya que la energía cinética, ganada por las moléculas que

escapan, se manifiesta en una pérdida de energía cinética de las moléculas que permanecen en su seno. Como resultado, la energía interna del líquido disminuye y, por tanto, también disminuye su temperatura.

El proceso de evaporación es muy importante en los ecosistemas y en la vida sobre nuestro planeta. Cuando el cuerpo humano, por factores externos, se calienta, inmediatamente entran en acción las glándulas sudoríparas y se produce sudor que al evaporarse por la piel, hace que la temperatura interior disminuya. De esta manera, se conserva la temperatura a un valor normal de 36°C . Otras formas de vida apelan a mecanismos distintos para regular su temperatura interior. Los perros y los cerdos, por ejemplo, no tienen glándulas sudoríparas y controlan su temperatura jadeando permanentemente, los primeros, o tomando un refrescante baño en su charca favorita, los segundos.



Los perros y los cerdos no tienen glándulas sudoríparas y para mantener su temperatura interior, los primeros jadean y los segundos se encharcan con frecuencia.

La evaporación de una sustancia líquida está sujeta a varios factores, entre los que destacan los siguientes:

- *La temperatura del líquido:* a mayor temperatura hay también un mayor incremento en la energía interna y, por lo tanto, un incremento en el número de moléculas que pueden escapar del líquido.
- *La superficie libre del líquido:* cuanto más grande es la superficie del líquido expuesta al estado gaseoso (por ejemplo al aire), mayor es la cantidad de moléculas que pasan de un estado al otro. Es más fácil, por ejemplo, que una porción de café con leche se enfríe en un plato que en una taza.

La evaporación juega un papel fundamental en el ciclo del agua en nuestro planeta. La gran cantidad de agua que se evapora en las superficies de mares y lagos y su posterior ascensión hacia las capas altas de la atmósfera, produce las lluvias que son esenciales en el mantenimiento de la vida.

El otro proceso, mediante el cual un líquido puede pasar al estado gaseoso, es por *ebullición*. En el proceso de evaporación, el cambio de estado de líquido a gas tiene lugar en la superficie. Bajo condiciones apropiadas, este mismo cambio puede darse debajo de la superficie del líquido. Cuando se aumenta considerablemente la temperatura, se forman burbujas en el seno del líquido, haciéndole cambiar al estado gaseoso. Esto se conoce como ebullición. La temperatura a la cual esto sucede se denomina *punto de ebullición*. Por ejemplo, el punto de ebullición del agua a presión atmosférica es de 100 °C. Es importante hacer notar que, durante el cambio de fase de líquido a gas por ebullición, la temperatura permanece constante, aun cuando haya que suministrar calor para mantener el proceso. A la cantidad de calor por unidad de masa, que debe proporcionarse para que se produzca el cambio de fase se le llama *calor latente de vaporización*, denotado por L_v .

En la tabla 12.4 se indican el punto de ebullición y el calor latente de vaporización de algunas sustancias a 1 atmósfera de presión. Observa que algunos elementos como el Nitrógeno y el Oxígeno hierven a temperaturas muy por debajo de 0 °C y que otros, como el Tungsteno, tienen puntos de ebullición muy altos.

En la fig. 12.17 se ilustra gráficamente los cambios de fase que experimenta 1 kg de agua al cambiar de un estado a otro y cómo esos cambios están relacionados con los calores latentes de fusión y evaporación.

Sustancia	Punto de Ebullición (°C)	Calor Latente de Vaporización (Kcal/kg)
Agua	100	540
Alcohol etílico	78	204
Nitrógeno	- 196	48
Oxígeno	- 183	51
Plomo	1.744	207
Mercurio	357	65
Tungsteno	5.900	1.150
Oro	2.660	377

Tabla 12.4 Puntos de ebullición y calor latente de vaporización para algunas sustancias, a 1 atmósfera de presión.

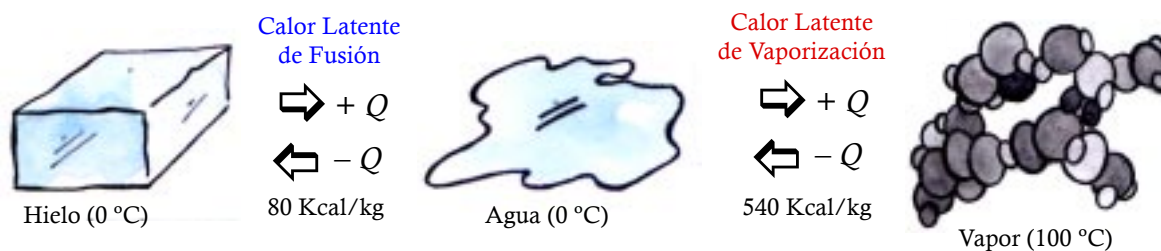


Fig. 12.17 El cambio de una fase a otra se logra añadiendo calor (+ Q) o quitando calor (- Q). Se muestran los valores de calor latente correspondientes al agua.

De acuerdo con la fig 12.8, se necesitan 80 Kcal por cada kg para convertir el hielo (agua en estado sólido) al estado líquido (+ Q) y se requiere retirar esta misma cantidad de calorías (- Q) para que el agua en estado líquido se convierta a hielo. En cualquier caso, la temperatura permanece constante a 0 °C durante el cambio de fase.

Cuando el agua pasa del estado líquido al gaseoso deben utilizarse 540 Kcal por cada kg (+ Q). Por el contrario, cuando pasa del estado gaseoso al líquido, deben extraerse 540 Kcal por cada kg. En los dos casos, la temperatura permanece constante a 100 °C.

Estado gaseoso: en esta fase, la separación entre las moléculas es mucho mayor que en los sólidos y líquidos. La fuerza de cohesión de las moléculas es ~~muy~~ pequeña, por lo que las mismas se mueven en todas las direcciones del espacio que ocupan.

El cambio de una sustancia del estado gaseoso al estado líquido se conoce con el nombre de *condensación*. Este proceso va acompañado de sustracción de energía del gas. Al quitar calor a una masa de vapor, su temperatura disminuirá y, cuando se alcance el valor que produjo la evaporación, el gas comenzará a condensarse. El punto de e vaporación es igual al punto de condensación y el calor latente de condensación es igual al *calor latente de vaporización*.

La formación de pequeñas gotitas de agua en la superficie de una lata fría de refresco o en el parabrisas de un car ro, son ejemplos de condensación. Las moléculas del v apor de agua chocan a alta v elocidad con las moléculas más lentas y , por lo tanto , de menor energía, de la superficie fría. Las moléculas de vapor ceden energía y el vapor se condensa.



Las nubes y la neblina se forman por condensación del aire.

Las nubes y la neblina se originan por la condensación del aire. Cuando el aire se calienta sube a las capas altas de la atmósfera. A medida que sube se expande y, como consecuencia, se enfría. Esto hace que las moléculas de vapor se agrupen, después de perder energía, al chocar entre sí. El proceso continúa, el aire se condensa y se forman nubes. La neblina es una n ube

que se forma cerca de la superficie terrestre. Cuando el tamaño de las gotitas en la ube se incrementa, aumentan su peso, su velocidad y, entonces, se producen lluvias.

El vapor de agua siempre está presente en el air en mayor o en menor cantidad. Hay, sin embargo, un límite a deter minada temperatura. Cuando el aire alcanza este límite , se dice que está *saturado*. La humedad relativa del aire indica la cantidad de vapor de agua, a una temperatura dada, en comparación con la cantidad de v apor cuando el aire está saturado. Cuando la humedad relativa es del 100%, el aire está saturado.

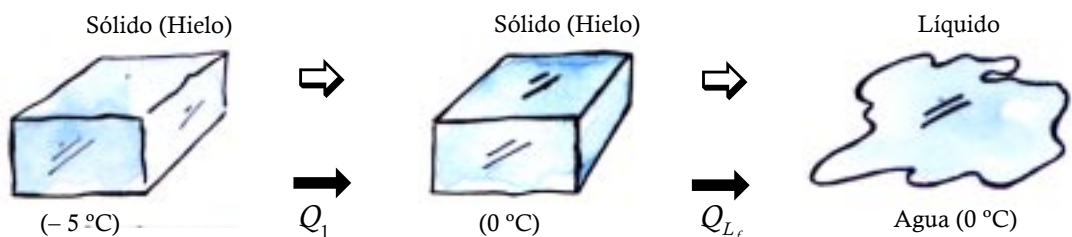
Ejemplo 12.7

Se tiene un bloque de hielo de 2 kg a una temperatura de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Determina la cantidad de calor necesaria para convertir el hielo en vapor, calentándolo a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Solución

El cálculo debemos hacerlo en tres etapas: paso de la fase sólida (hielo) a líquida, de la fase líquida a gaseosa y, luego, el calentamiento del gas a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cambio del estado sólido al líquido: tal como se muestra a continuación, hay que añadir calor para subir la temperatura del hielo de -5°C hasta 0°C . Luego, hay que suministrar calor adicional para hacer que el hielo pase al estado líquido.



El calor necesario para subir la temperatura de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ está dado por:

$$Q_1 = mc\Delta T = (2\text{ kg}) \cdot (1\text{ kcal/kg }^{\circ}\text{C}) \cdot (5\text{ }^{\circ}\text{C}) = 10\text{ kcal}$$

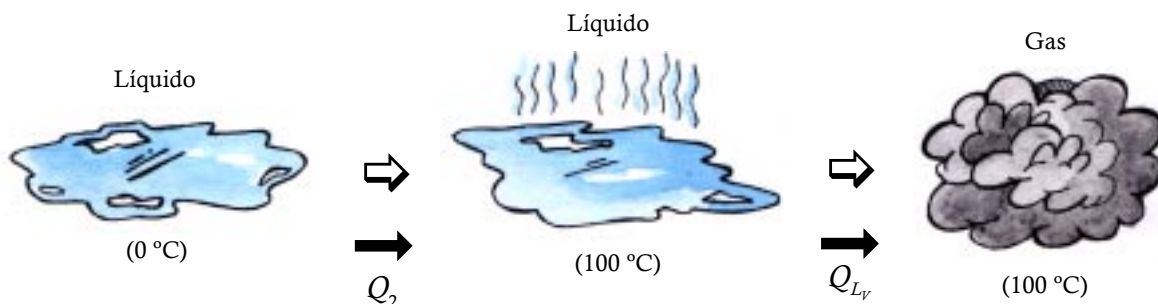
Para hacer pasar el hielo al estado líquido usamos el calor latente de fusión (Q_{L_f}):

$$Q_{L_f} = mL_f = (2\text{ kg}) \cdot (80\text{ kcal/kg}) = 160\text{ kcal}$$

Cambio del estado líquido al estado gaseoso: en este paso, se requiere calor para calentar el agua desde $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y para provocar el cambio de fase de líquido a gas. El diagrama que se muestra en la siguiente página indica los procesos involucrados. Las cantidades de calor se designan como Q_2 y Q_{L_v} , respectivamente.

El calor necesario para hacer subir la temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ es:

$$Q_2 = mc\Delta T = (2\text{ kg}) \cdot (1\text{ kcal/kg }^{\circ}\text{C}) \cdot (100\text{ }^{\circ}\text{C}) = 200\text{ kcal}$$



El cambio de la fase líquida a la gaseosa está relacionada con el calor latente de vaporización, Q_{L_v} :

$$Q_{L_v} = mL_v = (2 \text{ kg}) \cdot (540 \text{ kcal/kg}) = 1.080 \text{ Kcal}$$

Aumento de la temperatura de 100 °C a 120 °C: Se requiere una cantidad de calor dada por:

$$Q_3 = mc\Delta T = (2 \text{ kg}) \cdot (1 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}) \cdot (20 \text{ } ^\circ\text{C}) = 40 \text{ Kcal}$$

En total, la cantidad de calor que hay que agregar es:

$$Q_T = Q_1 + Q_{L_f} + Q_2 + Q_{L_v} + Q_3 = (10 + 160 + 200 + 1.080 + 40) \text{ kcal} = 1.490 \text{ Kcal}$$



PIENSA Y EXPLICA



- 12.74** Menciona los estados en los que comúnmente se encuentra la materia.
- 12.75** Investiga qué es el plasma.
- 12.76** ¿Qué caracteriza estructuralmente a los sólidos?
- 12.77** Define los puntos de fusión para un sólido y de solidificación para un líquido.
- 12.78** ¿Es la fusión un proceso de calentamiento o de enfriamiento?
- 12.79** ¿Es la solidificación un proceso de calentamiento o de enfriamiento?
- 12.80** ¿Por qué al añadir sal al agua se baja su temperatura de solidificación?

- 12.81** ¿Varía la temperatura de un sólido durante el proceso de fusión?
- 12.82** ¿Qué es calor latente de fusión?
- 12.83** ¿Qué cantidad de kcal por kg de masa hay que suministrarle a una barra de plomo para que se funda?
- 12.84** ¿Cuáles son las características resaltantes de los líquidos?
- 12.85** Menciona los procesos mediante los cuales un líquido puede pasar al estado gaseoso. ¿En qué se diferencian esos procesos?
- 12.86** Explica el proceso de evaporación de un líquido.
- 12.87** ¿Para qué el ser humano suda? ¿Para qué un perro jadea y un cerdo se encharca?
- 12.88** ¿De qué factores depende la evaporación de un líquido?
- 12.89** ¿Cómo tiene lugar la ebullición en los líquidos? ¿Qué es el punto de ebullición? ¿Cuál es el punto de ebullición del agua?
- 12.90** ¿Cuál es la diferencia entre evaporación y ebullición?
- 12.91** ¿Qué es el calor latente de vaporización? ¿En qué unidades se expresa?
- 12.92** El calor latente de vaporización del plomo es 207 kcal/kg ¿Qué significa esto?
- 12.93** Explica el dibujo de la fig. 12.17.
- 12.94** Describe el estado gaseoso de una sustancia.
- 12.95** ¿Qué es condensación? Da ejemplos cotidianos de condensación.
- 12.96** ¿Cómo se forman las nubes? ¿Cuál es la diferencia entre nubes y neblina? ¿Por qué se produce la lluvia?
- 12.97** ¿Cuándo se dice que el aire está saturado?
- 12.98** ¿Qué es la humedad relativa?
- 12.99** ¿Qué es la sublimación?

CAPÍTULO 13



Naturaleza de las Ondas

13.1 ¿QUÉ ES UNA ONDA?

La noción de onda está fuertemente arraigada en nuestras mentes. Si a alguien se le preguntase qué es una onda, se imaginará, aun cuando no pueda describirla con precisión, movimientos repetitivos o perturbaciones que se propagan en un determinado medio.

Una onda se puede describir como una perturbación que viaja desde un punto a otro a través de un medio físico. El medio físico puede ser el aire, el agua, el vacío o cualquier otra sustancia sólida, líquida o gaseosa.

La influencia de las ondas en nuestras vidas cotidianas, estemos o no conscientes de su presencia, ha determinado muchos aspectos de lo que conocemos como civilización moderna. Las ondas musicales (sonido), las ondas luminosas, las microondas, las ondas de radio y televisión, las ondas sísmicas, son algunos ejemplos de cómo el concepto de onda se ha introducido en nuestro diario quehacer.

La comprensión de la naturaleza y características de las ondas, permite modificar las herramientas de las que hace uso la especie humana para garantizar una buena interrelación con su entorno. Así, el estudio de las ondas sísmicas ha dado origen a la creación de estructuras habitacionales, que puedan resistir los embates de terremotos.



Efecto destructor de las ondas sísmicas. El edificio colapsó, tal vez, debido a fallas en su estructura. (Terremoto en la ciudad de Cumaná, Venezuela, el 7 de Julio de 1997).

La foto de la destrucción de un edificio en la ciudad de Cumaná, Venezuela, el 7 de Julio de 1997, es indicativa de la capacidad energética de una onda. La energía que una onda es capaz de transferir de un sitio a otro puede dar origen a fenómenos destructivos, como el mostrado en la foto, o puede ser usada para hacer más agradable la vida del hombre. Este es el caso de las ondas de televisión o de las microondas que aun cuando no podemos visualizar, sabemos de su efecto sobre nuestro desenvolvimiento diario. Los programas de entretenimiento se materializan en las pantallas de los televisores, gracias a la transmisión de energía asociada con ondas electromagnéticas. Similarmente, las microondas se utilizan para calentar alimentos en los hornos de microondas. En este caso, la energía de las microondas, generadas en un equipo diseñado para estos efectos, se transfiere en forma de calor hacia los alimentos que se colocan en el interior del mismo. En general, podemos afirmar:

En todo fenómeno físico que envuelve la propagación de una onda, está siempre presente la transferencia de energía de un lugar a otro.

Lo afirmado anteriormente indica que, en el fenómeno de transmisión de una onda, algo

se traslada. Aquí, debemos hacer una distinción entre el movimiento de las partículas del medio donde se propaga la onda y el movimiento de propagación de la onda, propiamente dicha. Hemos afirmado que una onda se propaga en un medio. *Entendemos como medio una sustancia o material capaz de permitir la propagación de una onda.* Así, por ejemplo, las ondas de sonido se pueden propagar en medios líquidos como el agua o en medios gaseosos como el aire. En una onda que se propaga a lo largo de una cuerda, el medio lo constituye el material del que está hecha la cuerda. Analicemos este último caso, para lo cual nos referiremos a la fig. 13.1.

Un extremo de la cuerda es sostenido por la persona, mientras el otro lo mantiene fijo otra persona. Cuando la primera persona sube y baja su mano rítmicamente, alrededor de una posición media, produce una perturbación en la cuerda (onda), que se propaga a lo largo de la misma. Hablamos, entonces, del movimiento de propagación de la onda. Este movimiento tiene lugar, en la fig. 13.1, desde la izquierda hacia la derecha.

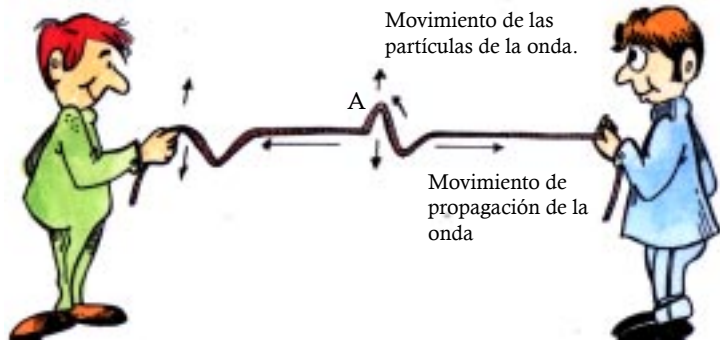


Fig. 13.1 Propagación de una onda en una cuerda.

Por otro lado, si fijamos nuestra atención a un punto cualquiera, A, sobre la cuerda, observamos que éste se mueve hacia arriba y hacia abajo, sin que tenga lugar traslación alguna del mismo a lo largo de la cuerda. Lo anterior, nos permite afirmar lo siguiente:

En la transmisión de una onda en un medio físico, lo que se propaga es la propia onda. Las partículas del medio permanecen desplazándose alrededor de una misma posición de equilibrio.

Un fenómeno similar se observa cuando se origina una onda, al lanzar una piedra en aguas tranquilas. Si se pone cuidadosamente la atención sobre cualquier objeto que flota en la superficie del agua, se notará que éste sube y baja sin trasladarse.

Algo debe quedar claro: una onda es un vehículo para transportar energía de un sitio a otro. En el caso de la fig. 13.1, el hombre, al mover verticalmente la cuerda, realiza un trabajo sobre la misma. Este trabajo se convierte en energía, haciendo que las partículas de la cuerda se muevan secuencialmente, trasladando la energía inicial aportada por el hombre hasta el final de la cuerda. Allí, la segunda persona sentirá el efecto de la propagación de la energía inicial.

Si la persona de la fig. 13.1 sube y baja la cuerda y, luego, detiene su mano, se produce sólo un *pulso de onda*, el cual se propaga en el espacio a medida que el tiempo transcurre, tal como se muestra en la fig. 13.2.

A medida que el tiempo transcurre, el pulso de onda se va alejando de su punto de origen, afectando, sucesivamente, todas las partículas de la cuerda, hasta llegar al extremo opuesto. La forma del pulso corresponde, en el caso mostrado, a una onda tipo sinusoidal.

Si se presta atención a un punto en particular de la cuerda, digamos el punto Q de la fig. 13.2, se observará que éste comienza a subir, alcanza un valor máximo, $V_{\max}$, y luego, desciende hasta alcanzar un valor mínimo, $V_{\min}$. Este movimiento tiene, también, la misma característica sinusoidal que posee la onda al propagarse en el espacio.

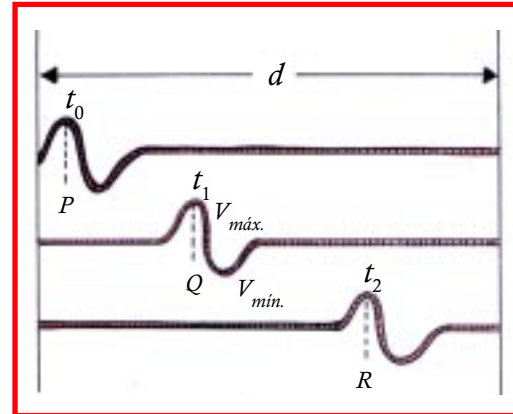


Fig. 13.2 Propagación de un pulso de onda en el espacio, en función del tiempo transcurrido.

Si la persona que sostiene la cuerda en la fig. 13.1 mantiene un movimiento continuo, hacia arriba y hacia abajo, sobre la cuerda, enviará, no un pulso de onda, sino un tren de ondas a lo largo de la misma. Al objeto o persona que actúa generando las ondas, usualmente se le conoce como *fente o generador de ondas*.

13.2 ONDAS TRANSVERSALES, LONGITUDINALES Y DE SUPERFICIE

El espacio que nos rodea está constantemente afectado por la acción de diferentes tipos de ondas, algunas de las cuales son visibles a simple vista y pueden diferenciarse entre sí por ciertas características. Una manera de caracterizar a las ondas se basa en la comparación de la dirección del movimiento de las partículas del medio, respecto a la dirección de propagación de las ondas. De acuerdo a esto hablamos de *ondas transversales*, *ondas longitudinales* y *ondas de superficie*.

En una onda transversal, las partículas del medio de transmisión se mueven en una dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Un ejemplo típico de ondas transversales es el de un pulso de onda, que se genera al mover rápidamente una cuerda hacia arriba y, luego, hacia abajo, como se muestra en la fig. 13.3.

Como puede observarse, las partículas del medio, en este caso la cuerda, se mueven hacia arriba y hacia abajo, mientras que la onda se propaga hacia la derecha. Es decir, sus direcciones son perpendiculares entre sí.

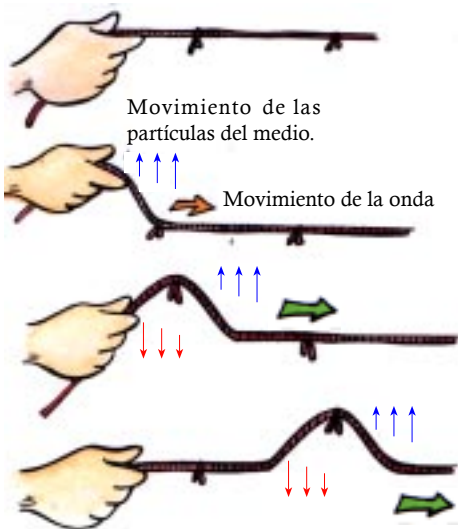


Fig. 13.3 Ejemplo de una onda transversal: la onda viaja hacia la derecha, mientras que las partículas del medio (en este caso la cuerda) se mueven hacia arriba y hacia abajo.

Las ondas transversales sólo pueden propagarse en medios sólidos, ya que los líquidos y gases no pueden soportar el efecto cortante de este tipo de perturbación. En efecto, si el medio de transporte no es rígido, como en el caso de los líquidos y gases las partículas se deslizan entre sí, impidiendo el establecimiento de un movimiento perpendicular a la dirección en que viaja la onda.

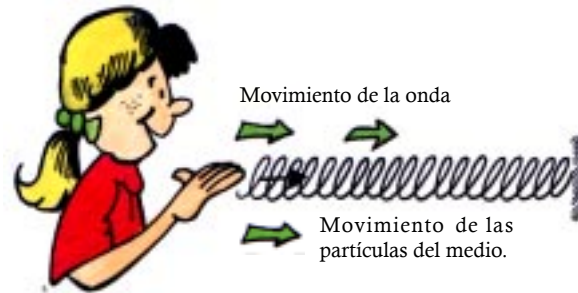


Fig. 13.4 Ejemplo de una onda longitudinal: la onda viaja de izquierda a derecha y las partículas del medio se mueven en la misma dirección.

En una onda longitudinal, las partículas del medio se mueven en una dirección paralela al movimiento de propagación de la onda. Si se estira un resorte, como se muestra en la fig. 13.4 y se le transmite un movimiento horizontal brusco hacia la izquierda y después, hacia la derecha, se produce una onda longitudinal, que se mueve, también, hacia la izquierda y hacia la derecha. Pulsos alternados de compresión y relajamiento hacen que la onda se propague en una dirección paralela al movimiento de los espirales del resorte.

Las ondas de sonido son un ejemplo típico de ondas longitudinales. Cuando el aire es perturbado por una fuente de sonido, por ejemplo una corneta, las partículas de aire se mueven hacia delante y hacia atrás, creando zonas de compresión y de expansión en la dirección de transporte de energía. Esto se ilustra en la fig. 13.5, donde las zonas oscuras corresponden a compresiones y las zonas claras representan expansiones de las partículas.

Las ondas longitudinales pueden propagarse en gases, líquidos y sólidos. Aun cuando esto

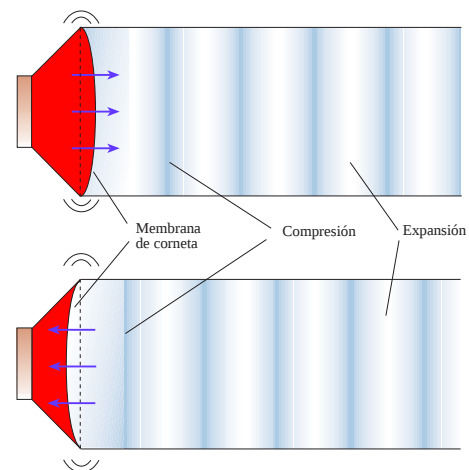


Fig. 13.5 Las ondas de sonido son ondas longitudinales. La fuente, en este caso una corneta, crea a su alrededor zonas de compresión y expansión.

parece más evidente en el caso de los gases, los líquidos y sólidos pueden comprimirse y relajarse, cuando se someten a la acción de una fuente de ondas. De hecho, es fácil detectar la transmisión de sonidos en el agua, cuando nos sumergimos en la playa.

Los movimientos sísmicos son capaces de producir tanto ondas transversales como ondas longitudinales. La *sismología* estudia las ondas generadas por temblores y terremotos.

Las ondas de superficie son aquellas en las cuales las partículas del medio son sometidas a un movimiento circular. Estas ondas se consideran como una mezcla de ondas transversales y longitudinales, ya que las partículas del medio se mueven en direcciones perpendicular y paralela a la dirección de la propagación de la onda. Las ondas que se originan en la superficie de los océanos, son un ejemplo de ondas de superficie. Mientras que en las profundidades del océano las ondas pueden considerarse longitudinales, a medida que nos acercamos a la superficie, éstas se convierten en ondas circulares. Los movimientos telúricos, también, originan ondas de superficie.

A menudo, los términos *ondas mecánicas* y *ondas electromagnéticas* se utilizan, también, para caracterizar a las ondas. *Las ondas mecánicas son aquellas que requieren un medio material para transportar su energía de un lugar a otro.* Las ondas de sonido son ondas mecánicas, porque requieren de ese medio material para propagarse. *Las ondas mecánicas no viajan en el vacío.* En la superficie lunar, donde no hay atmósfera, no se puede propagar el sonido.

Las ondas electromagnéticas son capaces de transportar energía, tanto en medios materiales como en el vacío. Ejemplos de ondas electromagnéticas son las ondas de radio, luz y calor. El Sol es una fuente permanente de ondas electromagnéticas. La vibración de partículas atómicas en la superficie solar produce ondas electromagnéticas que viajan a través del vacío interestelar para alcanzar, entre otros cuerpos celestes, a nuestro planeta.

13.3 CARACTERÍSTICAS DE UNA ONDA

Hemos visto que una onda transversal puede originarse al perturbar el extremo de una cuerda. Dependiendo del movimiento de la mano, que puede actuar como fuente de ondas, se originarán ondas de apariencias completamente distintas. Si la mano sube a partir de un nivel de referencia, y baja hasta este mismo nivel, se produce un pulso de onda, como el mostrado en la fig. 13.6. Este pulso no es sinusoidal.

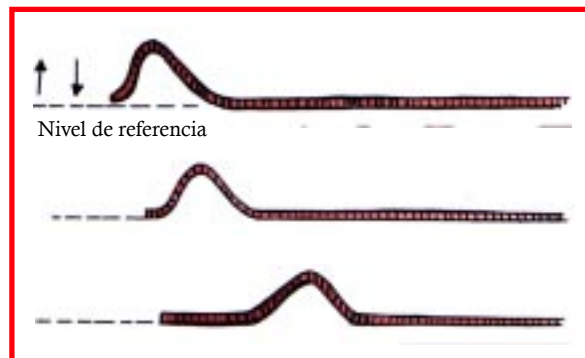


Fig. 13.6 Creación de un pulso no sinusoidal en una cuerda. El movimiento de la mano, indicado por las flechas, es desde el nivel de referencia hasta una cierta altura y, luego, se regresa al mismo nivel de referencia.

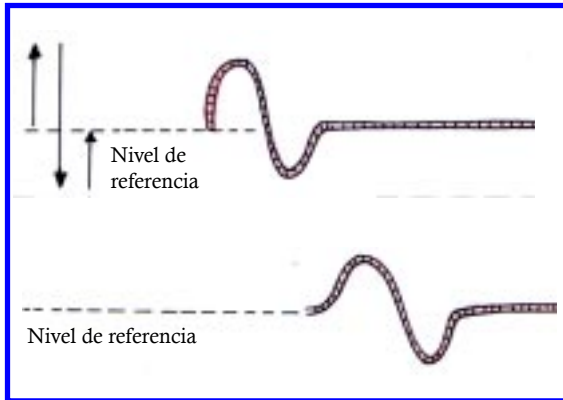


Fig. 13.7 El movimiento sobre la cuerda, indicado por las flechas, da origen a un pulso de onda sinusoidal.

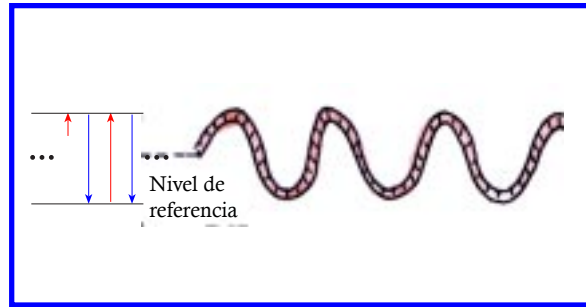


Fig. 13.8 Onda sinusoidal periódica, producida al realizar movimientos continuos, hacia arriba y hacia abajo, sobre el extremo de una cuerda.

Otra situación tiene lugar si la cuerda se sube hasta una posición máxima, se baja hasta una posición mínima, pasando por el nivel de referencia y, finalmente, se vuelve a este último. En este caso, tal como se indica en la fig. 13.7, se produce un pulso de onda sinusoidal. Si el movimiento anterior se hace repetitivo, se produce una onda sinusoidal periódica o continua, como la mostrada en la fig. 13.8.

La onda sinusoidal es de gran importancia en todas las ramas de la Física y de la Ingeniería. De allí que su estudio sea de gran relevancia para las ciencias. En los laboratorios se utilizan equipos capaces de generar este tipo de onda, para someter a experimentación a los más disímiles sistemas físicos. En la fig. 13.9 se muestra una onda sinusoidal en un momento cualquiera, durante su propagación hacia la derecha. Asumiremos que se trata de una onda creada en una cuerda. La línea punteada corresponde a la posición de equilibrio o de referencia de la onda. Este nivel de referencia se ha hecho coincidir con el eje X, donde se representa la distancia recorrida por la onda. Cualquier partícula de la

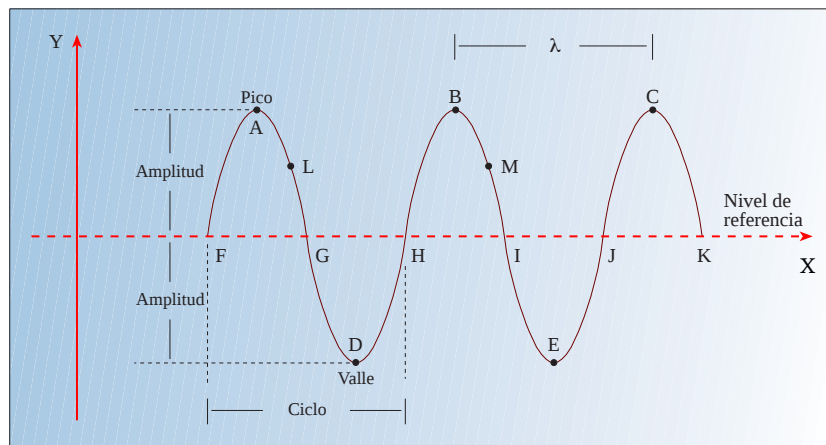


Fig. 13.9 Onda sinusoidal continua y sus características más resaltantes.

cuerda puede alcanzar el nivel máximo de desplazamiento, en relación con la referencia. Cuando este desplazamiento máximo está por encima del nivel de referencia, recibe el nombre de *pico*, mientras que si está por debajo recibe el nombre de *valle*. Así, los puntos A, B y C son picos de la onda, mientras que los puntos D y E corresponden a valles. Si se asume que el nivel de referencia tiene coordenada cero, según el eje Y, los puntos A, B y C corresponden a máximos desplazamientos positivos (picos), mientras que D y E corresponden a máximos desplazamientos negativos (valles).

La amplitud de una onda es el máximo desplazamiento de la misma, con respecto al nivel de referencia. De acuerdo a esto, la amplitud se mide desde el nivel de referencia al pico o al valle de la onda.

Otra característica notable de una onda es su *longitud de onda*. De la fig. 13.9 se observa que el patrón de formación de la onda es repetitivo: comienza en el punto F y, luego, se repite el patrón entre los puntos H y J. Se dice que se cumple un ciclo, cuando la onda comienza a repetirse según el eje X, a partir de un punto tomado como referencia. Así, si partimos del punto B y nos movemos sobre el eje X hacia la derecha, la onda comienza a repetirse al alcanzar el punto C. La distancia entre B y C correspondiente a un ciclo, es la longitud de onda en la fig 13.9. La longitud de onda puede medirse de un pico al próximo pico o de un valle al siguiente. En general, la longitud de onda puede medirse desde un punto cualquiera de un ciclo al punto correspondiente en el próximo ciclo. En la fig. 13.9, la longitud de onda puede ser la distancia entre A y B, F y H o entre L y M. La longitud de onda se denota, usualmente, por la letra griega λ (lambda).

En una onda longitudinal, las partículas del medio se desplazan en una dirección paralela a la dirección de propagación de la onda. Tomemos como ejemplo de una onda longitudinal, a una onda de sonido. Ya vimos que, cuando el aire es perturbado por este tipo de onda, se producen compresiones y expansiones de sus partículas, asociadas a la fuente que produce la perturbación. Si la fuente que origina las perturbaciones es sinusoidal, el patrón de compresiones y expansiones modifica la densidad del aire, en un patrón similar al de la fuente. La mayor densidad del aire corresponde a una mayor amplitud de la onda y la menor densidad está ligada a la menor amplitud de la misma. La fig 3.10 es indicativa de lo que aquí se trata de explicar. En la parte (a) se muestra el aire comprimiéndose (zonas oscuras) y expandiéndose (zonas más claras), de manera que su densidad asume valores máximos y mínimos, de acuerdo con un patrón sinusoidal. El valor normal de densidad, en la fig. 3.10, está asociado con la ausencia de perturbación del aire. La longitud de onda, en este caso, debe medirse como la distancia entre una compresión y la siguiente o entre dos expansiones consecutivas.

De lo tratado anteriormente, podemos imaginar que una onda transversal sinusoidal presenta un patrón periódico de picos y valles, mientras que una onda longitudinal sinusoidal presenta un patrón periódico de compresiones y expansiones.

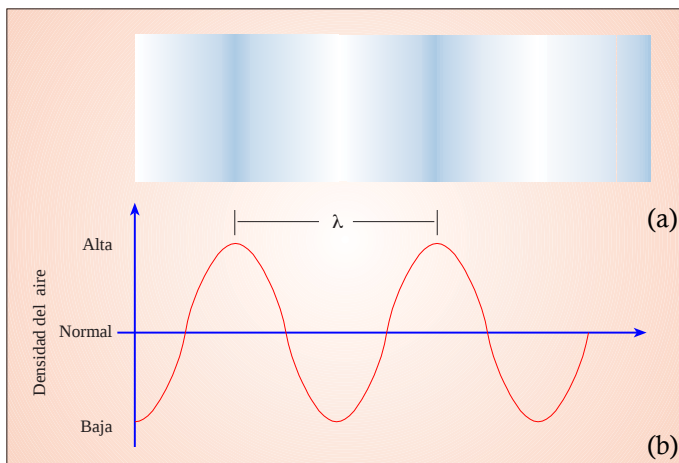
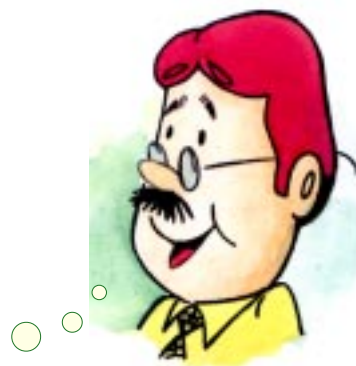


Fig. 13.10 Representación sinusoidal de una onda longitudinal de sonido.

Las ondas sinusoidales son utilizadas ampliamente para caracterizar diversos fenómenos físicos. Tienen su aplicación más difundida en el estudio de las ondas electromagnéticas.



PIENSA Y EXPLICA



- 13.1** ¿Qué es una onda?
- 13.2** Menciona algunos tipos de onda encontradas en nuestra vida diaria.
- 13.3** En la propagación de una onda, ¿qué es lo que se traslada?
- 13.4** En la propagación de una onda, ¿qué es el medio de transmisión?
- 13.5** ¿Cómo se propaga la energía en una cuerda?
- 13.6** ¿Qué es un pulso de onda?
- 13.7** ¿Qué es un tren de ondas?

- 13.8** ¿Qué es una onda transversal? Explica cómo una onda transversal se propaga en una cuerda.
- 13.9** ¿En qué medios se propaga una onda transversal?
- 13.10** ¿Por qué una onda transversal no puede propagarse en medios líquidos o en medios gaseosos?
- 13.11** ¿Qué es una onda longitudinal? Explica cómo una onda longitudinal se propaga en un resorte.
- 13.12** ¿A qué tipo de onda corresponde el sonido? ¿Cómo se propaga el sonido en el aire?
- 13.13** ¿Se puede propagar el sonido en líquidos y sólidos?
- 13.14** ¿Qué tipos de ondas se producen en los terremotos?
- 13.15** ¿Qué son ondas mecánicas?
- 13.16** ¿Por qué las ondas de sonido no se propagan en el vacío?
- 13.17** Si una onda transversal transporta energía del Norte al Sur, ¿cuál es la dirección de movimiento de las partículas del medio?
- 13.18** Una onda transporta energía del Norte al Sur, mientras que las partículas del medio se mueven hacia arriba y hacia abajo. ¿De qué tipo de ondas se trata: transversal, longitudinal, mecánica, electromagnética?
- 13.19** En una película de ciencia - ficción se observa a los tripulantes de una nave espacial, oyendo el sonido de otra nave que les pasa cerca. ¿Qué hay de erróneo en la escena?
- 13.20** Alguien afirma lo siguiente, con respecto a una onda mecánica : **a)** Es producida por perturbaciones del medio. **b)** Transporta energía. **c)** Se propaga en dirección perpendicular al movimiento de las partículas del medio. ¿Es correcto todo lo afirmado?
- 13.21** Los barcos utilizan ondas de sonido para localizar bancos de peces. El sistema, llamado sonar, ¿generará ondas longitudinales o transversales en el agua?

13.4 FRECUENCIA Y PERÍODO DE UNA ONDA

Consideremos, nuevamente, una cuerda sometida a la acción de una fuente continua de ondas sinusoidales en uno de sus extremos y prestemos atención a un punto cualquiera P sobre la misma (ver fig. 13.11). El punto P se desplaza hacia arriba y hacia abajo del nivel de referencia, pero no se mueve a lo largo de la cuerda. Sólo la onda se propaga, haciendo que todos los puntos de la cuerda se muevan verticalmente, de tal forma que crea un patrón sinusoidal. A medida que el tiempo transcurre, cada punto P sube hasta un pico y baja hasta un valle. Observa que la onda se propaga según el eje X, calibrado en unidades de distancia. La longitud de onda mide la distancia entre dos picos, por ejemplo, y se expresa en cm, m u otra unidad de longitud conveniente.

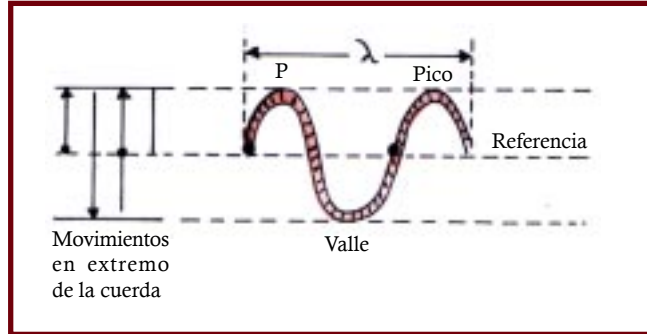


Fig. 13.11 En una cuerda, cualquier punto P sube y baja, de acuerdo con la fuente de onda sinusoidal que causa la perturbación.

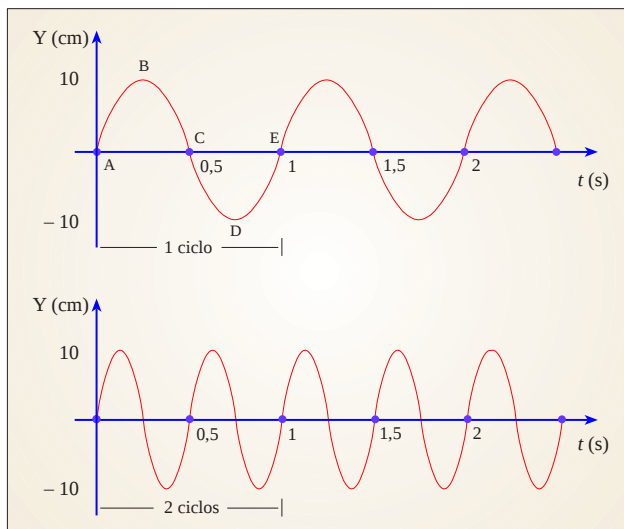


Fig. 13.12 Desplazamiento vertical de un punto de una onda, a medida que transcurre el tiempo: a) La frecuencia es de 1 ciclo/segundo. b) La frecuencia es de 2 ciclos/segundos.

respecto al nivel de referencia. Cuán a menudo lo hace, depende de las veces que la fuente de perturbación (por ejemplo, la mano) hace subir o bajar la cuerda. En la fig. 13.12(a), el punto P de la cuerda inicialmente está en el nivel de referencia A ($y = 0$ cm). Cuando $t = 0,25$ s, el punto P alcanza su máximo desplazamiento (B) y luego, comienza a descender, pasa por el nivel de referencia (C) cuando $t = 0,5$ s, hasta alcanzar el punto

Ahora bien, si se mide el desplazamiento del punto P a medida que el tiempo transcurre, obtendremos patrones como los de la fig. 13.12. La escala de tiempo está en segundos, mientras que la escala vertical mide la distancia a la cual se encuentra el punto P, con respecto al nivel de referencia. Supondremos que la máxima distancia vertical (pico) es de 10 cm y que la mínima distancia vertical (valle) es de 10 cm, por debajo del nivel de referencia (igual a -10 cm).

A medida que la perturbación se propaga a lo largo de la cuerda, el punto P asciende y desciende con

más bajo en D ($t = 0,75$ s). A partir de allí, comienza a subir hasta E (nivel de referencia) cuando $t = 1$ s. El desplazamiento vertical del punto P sobre la cuerda se repite nuevamente a partir de E. Entre A y E se ha completado un ciclo y como ha transcurrido un segundo, se dice que la frecuencia de la onda es de 1 ciclo/segundo.

En la fig. 13.12(b), el punto P completa 2 ciclos cada segundo y se dice que su frecuencia es de 2 ciclos/segundos. En términos generales, para ondas mecánicas podemos afirmar:

La frecuencia de una onda determina cuán a menudo las partículas del medio vibran, cuando la onda se propaga en dicho medio.

La unidad de frecuencia es el her tz (Hz), que corresponde a 1 ciclo/segundo. Así, si decimos que una onda tiene una frecuencia de 100 Hz, estamos afirmando que se suceden 100 ciclos cada segundo. La frecuencia se denota mediante la letra f . Cuando decimos que un evento es periódico, queremos significar que éste se repite cada cierto intervalo de tiempo. De la misma manera, una onda es periódica si hace vibrar a las partículas envueltas en la propagación de las ondas, en forma similar, cada cierto tiempo.

El período de una onda es el tiempo que la misma tarda en completar un ciclo.

El período se mide en unidades de tiempo. Si una onda completa un ciclo en un segundo, entonces su período es igual a 1 s. El período se denota, usualmente, por la letra T . En la fig. 13.13 se indica el período de las ondas de la fig. 13.13.

En la fig. 13.13(a) el período se mide entre dos picos:

$$T = 1,25 - 0,25 = 1 \text{ s}$$

En la fig. 13.13(b) el período se mide entre dos cruces, por el nivel de referencia:

$$T = 0,5 - 0 = 0,5 \text{ s}$$

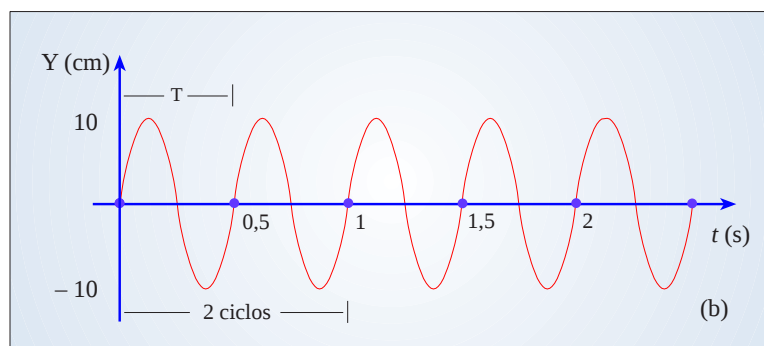
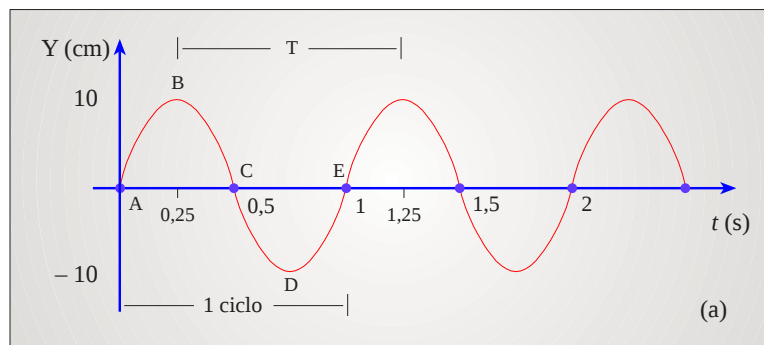


Fig. 13.13 a) El período es de $T = 1$ s. b) El período es de $T = 0,5$ s.

Aun cuando la frecuencia y el período son conceptos distintos, están íntimamente relacionados. La frecuencia expresa cuán a menudo un fenómeno tiene lugar, mientras que el período mide el tiempo que tarda el fenómeno en repetirse. La frecuencia se expresa en ciclos/segundos; el período se expresa en segundos/ciclos. Entonces, la frecuencia es el recíproco del período y viceversa. Matemáticamente, esto se expresa así:

$$\text{Frecuencia} = \frac{1}{\text{Período}} \quad \Rightarrow \quad f = \frac{1}{T} \quad (13.1)$$

$$\text{Período} = \frac{1}{\text{Frecuencia}} \quad \Rightarrow \quad T = \frac{1}{f} \quad (13.2)$$

Ejemplo 13.1

Una abeja mueve sus alas alrededor de 130 veces por segundo. ¿Cuáles son la frecuencia y el período de ese movimiento?

Solución

Cada vez que la abeja sube y baja sus alas completa un ciclo. Como esto lo hace 130 veces en un segundo, su frecuencia es de 130 ciclos/segundo o 130 Hz. Como $T = 1/f$, su período es:

$$T = \frac{1}{130 \text{ ciclo/s}} = 0,0077 \text{ s/ciclo}$$

Ejemplo 13.2

Una enfermera nota que el pulso de un paciente es de 80 latidos por minutos. ¿Cuál es su frecuencia en Hz? ¿Cuál es el intervalo de tiempo entre pulsaciones?

Solución

La frecuencia del pulso es de 80 pulsaciones/minuto. Para reducir este valor a pulsaciones/segundo procedemos así:

$$80 \frac{\text{pulsaciones}}{\text{min}} = \frac{80 \text{ pulsaciones}}{60 \text{ segundos}} = 1,33 \text{ pulsaciones/s}$$

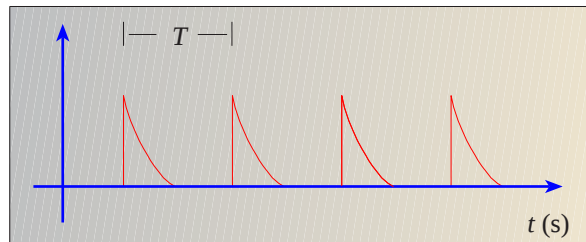
Como cada pulsación es un ciclo, podemos escribir:

$$f = 1,33 \frac{\text{ciclos}}{\text{s}} \quad \Rightarrow \quad f = 1,33 \text{ Hz}$$

El intervalo de tiempo entre pulsaciones corresponde al período de los pulsos:

$$T = \frac{1}{1,33 \text{ ciclo/s}} = 0,75 \text{ s/ciclo}$$

Lo cual indica que entre dos pulsos sucesivos hay 0,75 segundos.



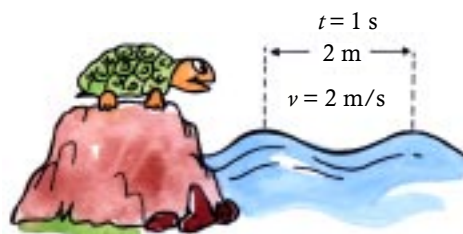
Cuando se mide el pulso de un paciente, el período corresponde al tiempo entre dos pulsos consecutivos.

13.5 RAPIDEZ DE PROPAGACIÓN DE UNA ONDA

A menudo, la frecuencia de una onda es confundida con la rapidez de la misma. La rapidez de una onda tiene que ver con la distancia que viaja un punto de la misma, por ejemplo un pico, en un tiempo dado. La frecuencia tiene que ver con la repetición de la onda, cada cierto tiempo. Una onda puede tener una frecuencia muy alta y viajar en un medio a una rapidez muy baja. Por el contrario, puede tener una frecuencia muy baja y propagarse a alta velocidad.

Cuando se produce una onda en el seno de un líquido, se puede observar cómo un pico de la misma se propaga, a medida que el tiempo transcurre. Si, por ejemplo, se observa que la cresta de una ola recorre 2 m en un segundo, su rapidez será:

$$v = 2 \text{ m/s}$$



En general, la rapidez de una onda está dada por:

$$\text{Rapidez} = \frac{\text{Distancia que viaja un punto de la onda}}{\text{Tiempo que tarda en cubrir la distancia}} \Rightarrow v = \frac{d}{t}$$

La rapidez de propagación de una onda depende del medio donde se propaga. Así, por ejemplo, la rapidez del sonido en el aire es, aproximadamente, igual a 343 m/s (a 20°C), mientras que en el agua es de 1.500 m/s. Las propiedades del medio (densidad, elasticidad, temperatura) determinan, también, la rapidez de propagación de una onda. Una onda de sonido se propaga en el aire a 0°C con una rapidez de 331 m/s, mientras que a 100°C su rapidez es de 387 m/s.

Es necesario puntualizar que la frecuencia no afecta la rapidez de propagación de una onda. En una presentación musical se producen sonidos a diferentes frecuencias, dependiendo de los instrumentos utilizados. Las ondas producidas por un saxofón tardarán

tanto en llegar a un mismo espectador como las generadas por un violín.

La rapidez de propagación de una onda depende también de su naturaleza. Las ondas electromagnéticas, originadas por la vibración de partículas atómicas, se transmiten a una velocidad de 300.000 km/s en el vacío. Esto significa que un pico cualquiera de una onda electromagnética recorre ¡300.000 km en 1 segundo! Una onda de sonido puede alcanzar 5.100 m en un segundo, cuando se transmite en aluminio.

Existe una relación entre rapidez y frecuencia de una onda, que podemos deducir basándonos en la fig. 13.14. Cuando se introduce una perturbación en una cuerda que origina una onda sinusoidal, esta cubre una distancia λ (longitud de onda) en un período de tiempo T . Entonces, la rapidez de una onda es:

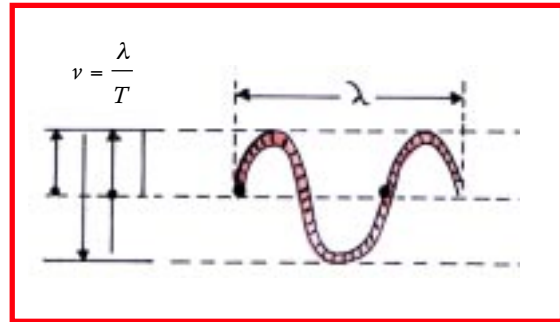


Fig. 13.14 La rapidez de una onda está dada por el cociente entre la longitud de onda y el período.

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

(13.3)

Como, de acuerdo a (13.1), $T = 1/f$, la relación anterior puede escribirse como:

$$v = \lambda f$$

(13.4)

La relación (13.4) se conoce como la *ecuación de la onda* y establece la dependencia matemática entre la rapidez de una onda, su longitud de onda y su frecuencia.

Ejemplo 13.3

La frecuencia más baja que el ser humano puede oír está alrededor de 20 Hz. ¿Cuál es la longitud de onda correspondiente a esa frecuencia, si el sonido se propaga con una rapidez de 340 m/s?

Solución

De acuerdo con la relación (13.4):

$$v = \lambda f \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{v}{f} = \frac{340 \text{ m/s}}{20 \text{ Hz}} = \frac{340 \text{ m/s}}{20 \text{ ciclos/s}} = 17 \text{ m/ciclo}$$

Es decir, cada ciclo de la onda de sonido de 20 Hz mide 17 m.

Ejemplo 13.4

Una emisora FM transmite a una frecuencia de 90,4 MHz. ¿Cuál es su longitud de onda? ¿Cómo se compara con la longitud de onda del sonido a 20 Hz?

Solución

Como las ondas de radio son ondas electromagnéticas su rapidez es de 300.000 km/s o $3 \cdot 10^8$ m/s. Entonces:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{90,4 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 3,32 \text{ m/ciclo}$$

Si dividimos el resultado del ejemplo (13.3) por λ :

$$\frac{\lambda_{\text{Sonido}}}{\lambda_{\text{FM}}} = \frac{17}{3,32} = 5,12$$

Lo que indica que la onda de sonido tiene una longitud de onda 5,12 veces mayor que la onda FM.



Los receptores de radio captan las ondas electromagnéticas de frecuencia modulada (FM).

Ejemplo 13.5

Una onda de ultrasonido, usada para detectar el feto en el vientre materno, tiene una frecuencia de 2,2 MHz. ¿Cuánto dura el ciclo de esa onda? ¿Cuál es su longitud de onda?

Solución

Dado que $T = 1/f$:

$$T = \frac{1}{2,2 \cdot 10^6 \text{ ciclos/s}} = 0,45 \cdot 10^{-6} \text{ s/ciclo} = 0,45 \text{ } \mu\text{s/ciclo}$$

Lo que indica que cada ciclo dura 0,45 μs . Como la onda de ultrasonido dentro del vientre materno se propaga en un medio acuoso su rapidez es de, aproximadamente, 340 m/s. La longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{340 \text{ m/s}}{2,2 \cdot 10^6 \text{ ciclos/s}} = 154,54 \cdot 10^{-6} \text{ m/ciclo}$$



PIENSA Y EXPLICA



- 13.22** Di cómo se pueden generar un pulso, un pulso de onda sinusoidal y una onda sinusoidal periódica en una cuerda.
- 13.23** Define picos, valles y amplitud en una onda sinusoidal.
- 13.24** En una onda sinusoidal, ¿qué es un ciclo? ¿Qué es longitud de onda?
- 13.25** En una onda de sonido, define compresión y expansión.
- 13.26** ¿Cómo se mide la longitud de onda en una onda de sonido?
- 13.27** Define la rapidez de una onda. ¿Cómo podrías medirla?
- 13.28** ¿De qué depende la rapidez de propagación de una onda?
- 13.29** ¿Cuál es la rapidez de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío? ¿Del sonido en el aire y en el agua?
- 13.30** Define frecuencia y período de una onda. Haz el gráfico ilustrativo.
- 13.31** En qué unidades se miden la frecuencia, el período y la velocidad de una onda. ¿Qué es 1 Hz?
- 13.32** ¿Cuál es el rango de frecuencias al aproximado de audición del ser humano?
- 13.33** Una onda tiene un período de 10 segundos. ¿Qué significa esto?
- 13.34** Una onda tiene una frecuencia de 10 Hz. ¿Qué significa esto?
- 13.35** ¿Qué queremos decir cuando afirmamos que una onda es periódica?
- 13.36** ¿Qué relación hay entre frecuencia y período de una onda?
- 13.37** Una emisora de FM anuncia su ubicación en el dial de la radio como “89 FM”. ¿Qué quiere expresar?
- 13.38** Si la frecuencia de una onda aumenta, ¿qué sucede con su longitud de onda y su período?



PROBLEMAS



- 13.1** En la figura 13.15 se muestra una onda que se propaga en el aire A qué letras corresponde la amplitud de la longitud de onda.
- 13.2** ¿Cuáles intervalos representan una longitud de onda en la figura 13.16.

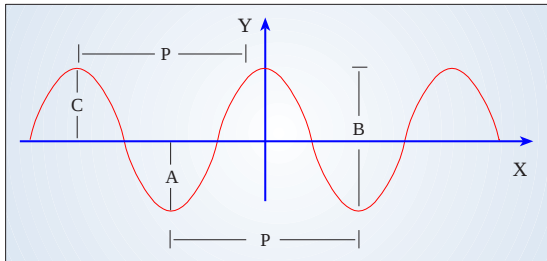


Fig. 13.15 Problema 13.1.

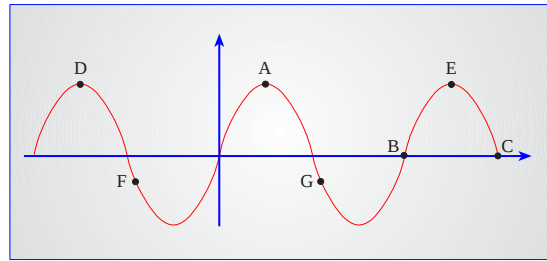


Fig. 13.16 Problema 13.2.

- 13.3** Los perros pueden oír sonidos a una frecuencia de 40 kHz, muy por encima de la máxima frecuencia de audición de los humanos. Si una onda de sonido se propaga a esa frecuencia, ¿cuál es su longitud de onda en el aire?
- 13.4** ¿Cuál es la longitud de las ondas de emisoras de radio de FM a 89 MHz y AM a 1.500 kHz. Investiga qué caracteriza a las ondas de AM y FM.
- 13.5** En condiciones normales, el corazón late a unas 80 pulsaciones por minutos. ¿Cuáles son la frecuencia y el período de las pulsaciones? Cuando estos latidos se hacen muy lentos se habla de *braquicardia* y cuando se hacen muy rápidos se habla de *tetaquicardia*. Investiga, en estos dos últimos casos, las frecuencias de los latidos.
- 13.6** ¿Cuáles son la frecuencia y el período del timbre de un teléfono residencial cuando repica? ¿Qué tipos de ondas están envueltas en una comunicación telefónica?

13.7 Un zancudo mueve sus alas alrededor de 600 veces por segundo, produciendo el ruido típico, que nos anuncia un posible pinchazo. ¿Cuál es la frecuencia en Hz de la onda de sonido escuchada? ¿Cuál es la longitud de la onda generada?



13.8 ¿Cuánto tiempo tarda una onda de sonido de 10.000 Hz en cubrir una distancia de 1 km en el aire? ¿Cuánto tardará una onda electromagnética?

13.9 Si una onda oscila, hacia arriba y hacia abajo, 3 veces en 2 segundos y se propaga a una distancia de 10 m durante ese tiempo, ¿cuál es su frecuencia? ¿Cuál es su rapidez? ¿Cuál es su período?

13.10 Una estación de observación marina reporta que olas de 1,8 m de altura y de 6 m de largo llegan a la estación cada 10 segundos. Determina la frecuencia y velocidad de las ondas.

13.6 REFLEXIÓN DE UNA ONDA

Cuando una onda se propaga en un medio y choca contra otro medio, se pueden producir tres fenómenos interesantes: la onda se devuelve, se transmite al segundo medio o parte se devuelve y parte se transmite. *Cuando la onda se devuelve, hablamos de reflexión.* Son ejemplos de reflexión las ondas luminosas, al chocar con un espejo y el eco producido por las ondas de sonido, al chocar con un obstáculo.

Consideremos un pulso generado en el extremo de una cuerda, que está fija en su otro extremo, tal como se muestra en la fig. 13.17. Al pulso que se desplaza de izquierda a derecha, se le conoce como *pulso incidente* y el que se devuelve al chocar contra la pared es el *pulso reflejado*.

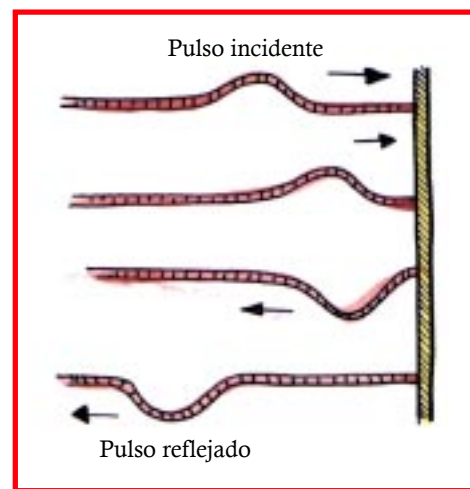


Fig. 13.17 Onda reflejada cuando uno de los extremos de la cuerda está fijo.

Cuando se alcanza el límite de la pared, parte de la energía que lleva el pulso se refleja y otra se transmite hacia la pared. Supongamos que esta última energía es muy pequeña. Entonces, la mayor parte de la energía se devuelve con el pulso reflejado, con la particularidad de que el mismo se invierte en relación con el pulso incidente.

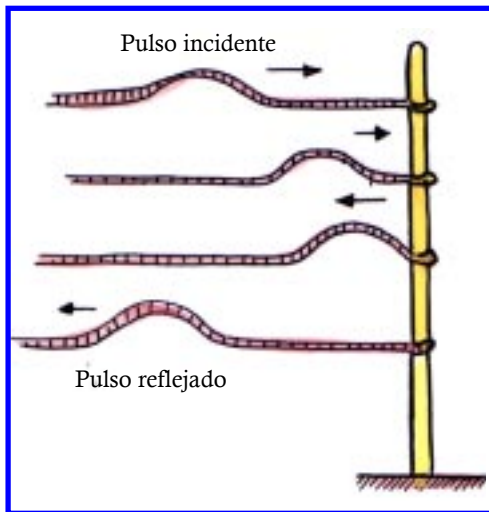


Fig. 13.18 Onda reflejada cuando ambos extremos de la cuerda están libres.

¿Por qué se invierte el pulso incidente al reflejarse? Observa que la onda interactúa con dos medios distintos: el de la cuerda y el de la pared. Cuando el pulso incidente choca con la pared, ejerce una fuerza hacia arriba sobre ella. De acuerdo a la tercera ley de Newton, de acción y reacción, la pared ejerce una fuerza, igual y opuesta, sobre la cuerda que da origen al pulso invertido. Es necesario advertir, que el pulso se invierte por estar el otro extremo fijo a una pared rígida. Si esta condición no se cumple, como es el caso de la fig. 13.18, el pulso reflejado no se invierte con respecto al pulso incidente. En este caso, el extremo derecho de la cuerda puede moverse libremente alrededor del poste.

Cuando una onda se transmite en un medio y se refleja, como en las cuerdas de las figs. 13.17 y 13.18, podemos notar lo siguiente:

1. El pulso reflejado tiene menor amplitud que la del pulso incidente ya que parte de la energía se transfiere hacia el otro medio (la pared o el poste).
2. La velocidad del pulso incidente es igual a la del pulso reflejado.
3. La longitud de onda, para un pulso o una onda sinusoidal continua, es similar tanto para la onda incidente como para la onda reflejada.

Consideremos ahora la fig. 13.19. Un *frente de onda*, constituido por ondas que inciden sucesivamente sobre una superficie, con la cual forman un ángulo de incidencia, θ_i , se refleja en la misma superficie con un ángulo de reflexión θ_r . Ambos ángulos se miden con respecto a la recta normal N . El rayo incidente representa a las ondas que chocan y el rayo reflejado representa a las ondas que rebotan de la superficie. Es un hecho experimental que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Es decir,

$$\theta_i = \theta_r$$

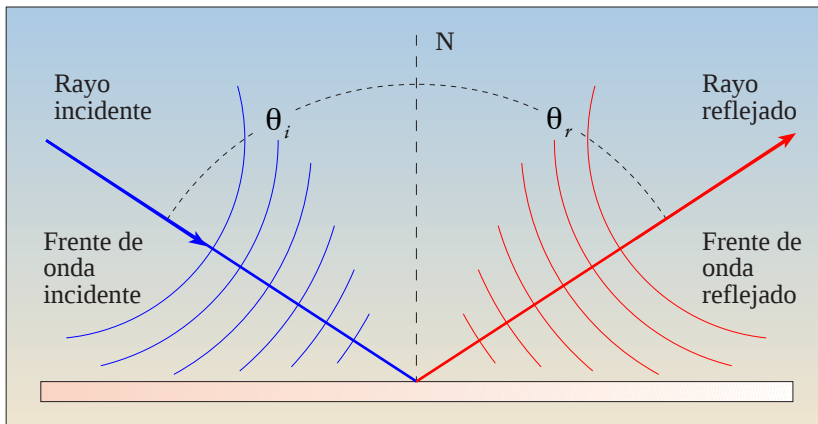


Fig. 13.19 El ángulo de la onda incidente θ_i es igual al ángulo de la onda reflejada, θ_r .

13.7 REFRACCIÓN DE UNA ONDA

Cuando una onda, que se desplaza en un medio A, choca contra un obstáculo, parte de la energía se refleja, parte es absorbida por el obstáculo y el resto se transmite. Si esta transmisión tiene lugar en un medio B, distinto al primero, se habla de *refracción de la onda*. Cuando una onda pasa de un medio a otro, sufre un cambio de dirección, acompañado de un cambio en la rapidez y en la longitud de onda. El cambio de dirección de la onda incidente se representa en la fig. 13.20. El ángulo de incidencia θ_i , no es igual al ángulo de refracción, θ_R .

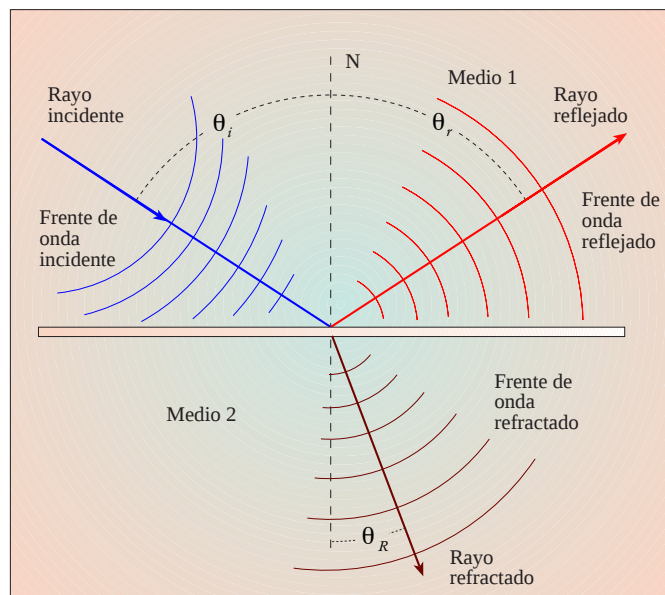


Fig. 13.20 Cuando una onda encuentra un obstáculo, parte de ella se refleja y parte de refracta.

Hay que hacer notar lo siguiente, con respecto al rayo refractado y en relación a la fig. 13.20:

- Cuando el medio 2 es más denso que el medio 1, el rayo refractado se acerca a la normal N y, por tanto, $\theta_R < \theta_i$.
- Cuando el medio 2 es menos denso que el medio 1, el rayo refractado se aleja de la normal N y, por tanto $\theta_R > \theta_i$.

Si volvemos al caso de la propagación de un pulso de onda sobre una cuerda, podemos distinguir dos situaciones en las cuales se produce reflexión y refracción: si una cuerda liviana (medio A) se une en uno de sus extremos a una más pesada (medio B), la onda refractada no se invierte, mientras que la onda reflejada sufre una inversión (fig. 13.21). En la fig. 13.22 el medio A es más denso (cuerda más pesada) que el medio B. Como consecuencia, las ondas reflejadas y refractadas no se invierten.

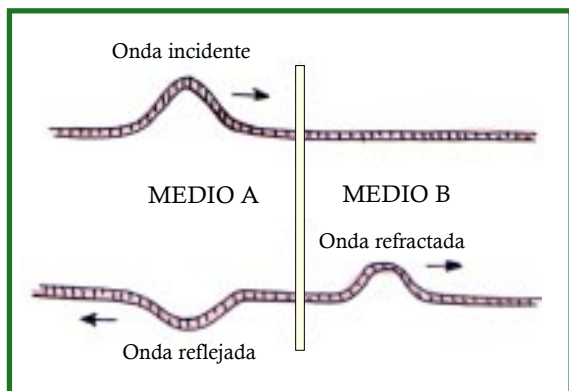


Fig. 13.21 El medio B es más denso que el medio A. La onda refractada no se invierte, la onda reflejada sí se invierte.

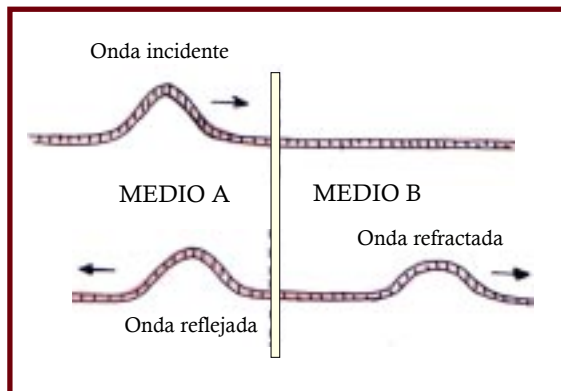


Fig. 13.22 Si el medio A es más denso que el medio B, no hay inversión en las ondas reflejada y refractada.

13.8 DIFRACCIÓN DE UNA ONDA

La capacidad de una onda para dejar sentir sus efectos detrás de un obstáculo se conoce como difracción. Una onda de sonido, por ejemplo, puede “doblar una esquina” y ser captada por una persona colocada detrás de la esquina.

En general, la difracción de una onda tiene que ver con la curvatura que sufre la misma alrededor del borde de un objeto. Este efecto, tal como se muestra en la fig. 13.23, es mayor cuando el tamaño del objeto o la abertura que produce la difracción es de igual tamaño o menor que la longitud de onda de las ondas en cuestión en el fenómeno. La difracción permite que una onda de sonido pueda “cruzar la esquina”.

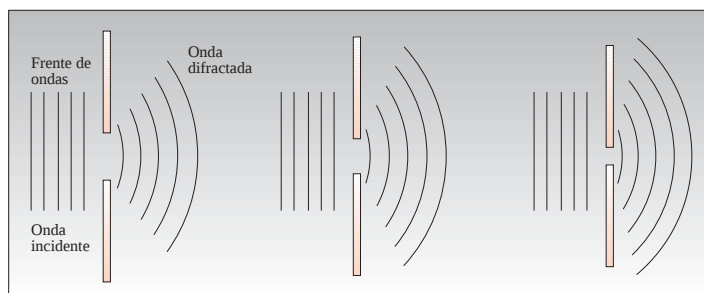


Fig. 13.23 La difracción se hace más notable, a medida que el tamaño de la apertura se acerca a la longitud de la onda incidente.



13.9 SUPERPOSICIÓN E INTERFERENCIA DE ONDAS

Cuando dos o más ondas se desplazan a través de un medio, la onda resultante, en cualquier punto de su travesía, es la suma algebraica de las ondas individuales. Lo establecido anteriormente, constituye el *principio de superposición* aplicado a las ondas. Dos consecuencias importantes se derivan de este principio:

1. Dos ondas pueden pasar por el mismo sitio interferir una con la otra y salir del punto de encuentro, sin sufrir alteraciones.
2. Cuando dos ondas se encuentran producen un patrón de onda que difiere de cada una de ellas individualmente.

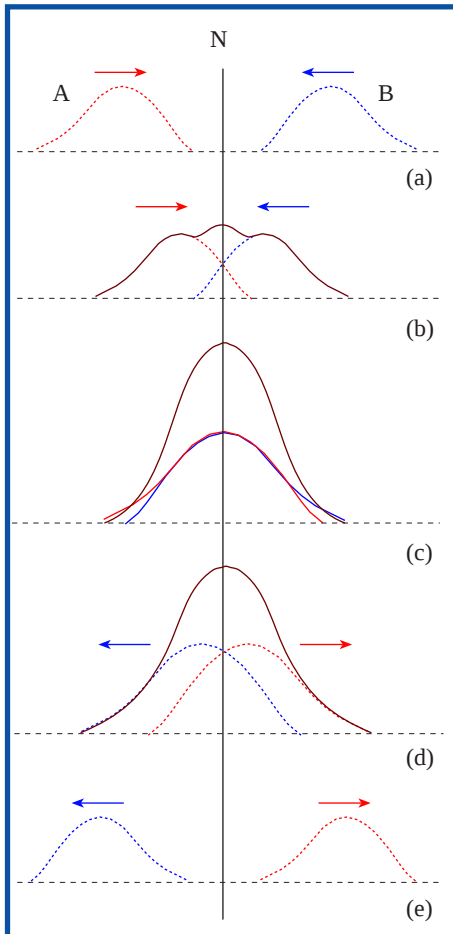


Fig. 13.24 Interferencia de dos pulsos de onda. Al cruzarse, las ondas se suman, dando origen a una interferencia constructiva

La *interferencia* de ondas denota lo que sucede cuando dos o más ondas se cruzan en la misma región del espacio. Cuando dos ondas interfieren, se observa el efecto neto de esa interacción, que se puede visualizar usando el principio de superposición. Patrones típicos de interferencia los encontramos en la propagación de pulsos de ondas, creados en los dos extremos de una cuerda, y que se acercan entre sí. En la fig. 13.24 dos picos de onda viajan en sentidos contrarios y tienen como punto de encuentro la recta N. Cuando los dos picos se cruzan en la recta N, sus valores se suman punto a punto, dando origen a la onda de color marrón mostrada en las partes (b), (c) y (d) de la fig. 13.24. Cuando las dos ondas coinciden, fig. 13.24(c), sus picos se suman y en el centro de la recta N se alcanza el valor máximo, producto de la interferencia de las dos ondas. Luego de cruzarse, cada onda se aleja de la recta N, fig. 13.24(e), sin sufrir alteración notable.

Al tipo de interferencia descrito anteriormente se le conoce como *interferencia constructiva*, porque los efectos de las ondas se refuerzan al encontrarse. Esta interferencia tiene lugar cuando dos picos o dos valles de ondas se encuentran. El medio por donde viajan las ondas experimenta un desplazamiento, en el caso de ondas mecánicas, como resultado de la interacción aditiva de las perturbaciones del medio.

Se produce *interferencia destructiva* cuando un pico y un valle de dos ondas se encuentran. La onda resultante corresponde a la línea de color marrón en la fig. 13.25. Como puede observarse, cuando el pico de una onda y el valle de la otra se colocan simétricamente alrededor de la línea N, los efectos de las perturbaciones se cancelan, por lo que no se observa ninguna onda. Esto es representado por la línea marrón, coincidente con el eje horizontal, tal como se indica en la fig. 13.25(c). En todo momento, el resultado corresponde a la diferencia, punto a punto, de las dos ondas. Luego de producirse la interferencia, cada onda sigue su propagación en forma independiente.

Los patrones de interferencia pueden resultar muy complejos, dependiendo de las características de las ondas en vueltas en la interacción.

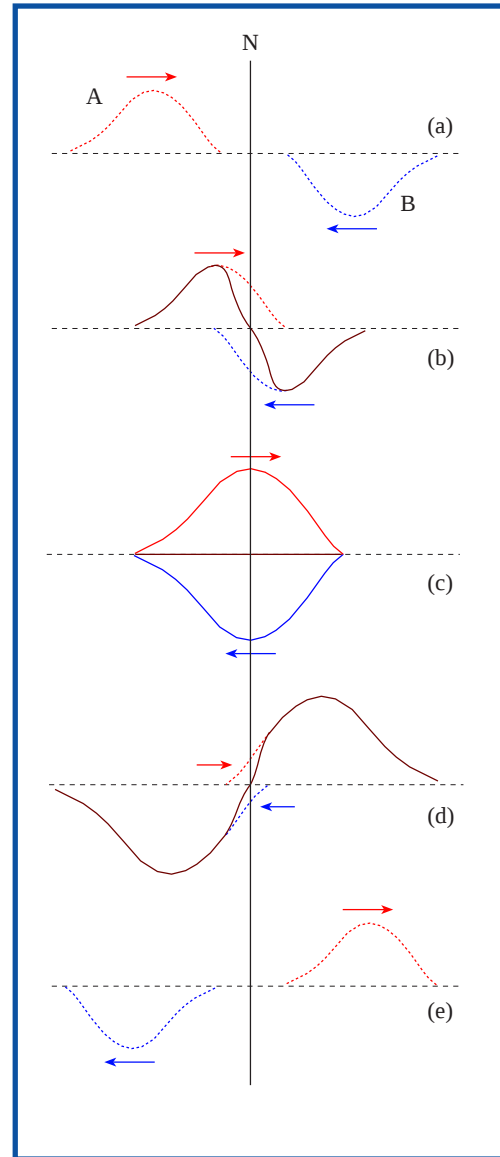


Fig. 13.25 Al cruzarse un pico de una onda con un valle de otra, se produce una interferencia destructiva.

13.10 ONDAS ESTACIONARIAS

Cuando una onda viaja en un medio, se propaga en forma indefinida, a menos que encuentre un obstáculo que modifique su propagación. A esta onda que se transmite en un medio sin reflejarse, se le llama *onda viajera*. Las ondas oceánicas son ejemplos de ondas viajeras. Son notables, dentro de ellas, las perturbaciones oceánicas generadas por los maremotos, que se propagan por miles de kilómetros, antes de alcanzar la playa.

Cuando una onda consigue un obstáculo, parte de la misma se refracta y parte se refleja. La onda reflejada interfiere con cualquier otra onda incidente, para generar un patrón que puede parecerse o no a la perturbación original.

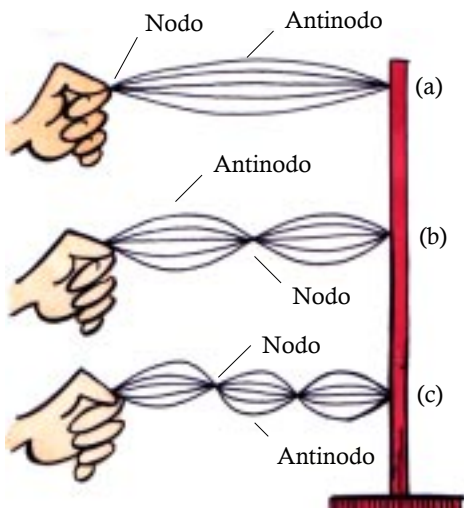


Fig. 13.26 Ondas estacionarias en una cuerda.

Consideremos una cuerda, uno de cuyos extremos se encuentra fijo, mientras que el otro extremo se somete a un movimiento vertical periódico, que genera una onda sinusoidal permanente, tal como se muestra en la fig. 13.26. Si se hace oscilar la cuerda a la frecuencia adecuada, las ondas incidentes y reflejadas pueden interferir, produciendo un efecto de *onda estacionaria* en la cuerda, lo cual da la sensación de que no se mueve onda alguna a lo largo de la misma. A los puntos de mayor amplitud sobre la cuerda se les conoce con el nombre de *antinodos* y a los de menor amplitud, se les llama *nodos*.

La frecuencia de oscilación más baja corresponde a la fig. 13.26(a), mientras que en las fig 13.26(b) y 13.26(c) la cuerda oscila a frecuencias doble y triple de la frecuencia más baja.

Las frecuencias a las cuales se originan ondas estacionarias se conocen como *frecuencias de resonancia*. A la primera frecuencia de resonancia se le llama *frecuencia fundamental* o *primer armónico*; a la segunda, *segundo armónico* y así sucesivamente.



PIENSA Y EXPLICA



- 13.39** Explica la reflexión de una onda, haciendo mención de lo que son la onda reflejada y la onda incidente.
- 13.40** ¿Por qué se invierte un pulso incidente al chocar con un obstáculo fijo?
- 13.41** ¿Qué características, en cuanto a amplitud, velocidad y longitud de onda, tiene una onda reflejada?
- 13.42** Explica cómo se refleja una onda, cuando incide con un ángulo sobre una superficie rígida.

- 13.43** Explica el fenómeno de refracción de una onda haciendo uso del gráfico apropiado.
- 13.44** ¿Qué características posee una onda refractada en comparación con la onda incidente?
- 13.45** ¿Cómo se comparan los ángulos de incidencia y de refracción?
- 13.46** Explica cómo son la reflexión y la refracción, cuando una onda se propaga en cuerdas de distintos diámetros y masas, unidas entre sí.
- 13.47** Explica el fenómeno de difracción de una onda.
- 13.48** ¿Qué características tiene una onda difractada comparada con una onda incidente?
- 13.49** Explica la difracción de ondas a través de una apertura y cómo influye el tamaño de la misma en la difracción.
- 13.50** Enuncia el principio de superposición de ondas y las consecuencias que se derivan del mismo.
- 13.51** ¿Qué se conoce como interferencia de ondas?
- 13.52** Describe el patrón resultante de la interferencia de dos pulsos que viajan en direcciones opuestas.
- 13.53** Describe la interferencia constructiva y la interferencia destructiva.
- 13.54** Explica el patrón de onda resultante de la fig. 13.24.
- 13.55** ¿Qué son ondas viajeras y ondas estacionarias?
- 13.56** ¿Cómo se generan las ondas estacionarias en una cuerda?
- 13.57** ¿Qué son nodos y antinodos en una onda estacionaria?
- 13.58** ¿Qué son frecuencias de resonancia? ¿A qué se les llama primero y segundo armónico?

CAPÍTULO 14



El Sonido

14.1 NATURALEZA DEL SONIDO

Las ondas sonoras son parte esencial de la comunicación entre los organismos vivos. La palabra es una manifestación máxima de los seres humanos, capaz de generar desde los más tiernos sentimientos hasta las más terribles y encontradas expresiones. Las manifestaciones orales han sido el detonante que ha provocado grandes decisiones en el devenir de la humanidad.

Aun cuando podría pensarse *que el sonido es toda perturbación que puede captar el oído humano*, en un sentido más amplio puede considerarse como *una onda mecánica que produce compresiones y expansiones, en el medio donde viaja y en la dirección del movimiento de la onda*.

El oído humano está diseñado para captar ondas sonoras en un rango o aproximado de frecuencias entre 20 Hz y 20.000 Hz. A este intervalo de frecuencias se le conoce como *rango audible*. A las frecuencias por debajo de 20 Hz se les conoce como *frecuencias infrasonicas* y a aquellas frecuencias, por encima de 20 Hz, se les denomina *frecuencias ultrasónicas*.

El hombre no es la única especie capaz de detectar un amplio rango de frecuencias. Los perros pueden captar frecuencias entre 50 Hz y 45.000 Hz. Los silbatos para dar instrucciones a los perros, emiten sonidos a frecuencias no audibles para los humanos. Los gatos detectan ondas de sonido en un rango entre 45 Hz y 85.000 Hz. Los murciélagos, mamíferos que vuelan, cuyo sentido de la vista está atrofiado, basan su veloz desplazamiento en las ondas de ultrasonido que emiten y detectan, a frecuencias tan altas como 120.000 Hz. Los apreciados delfines, pueden captar frecuencias de hasta 200.000 Hz. Por otro lado, los elefantes, con sus enormes orejas, pueden detectar frecuencias entre 5 Hz (infrasonido) y 10.000 Hz (rango audible).

Ya hemos dicho que el sonido es una onda mecánica. De acuerdo a esto, necesita un medio para propagarse. Usualmente, este medio es el aire, aunque podría ser cualquier medio sólido, líquido o gaseoso. Basta sólo comenzar a excitar a una de las partículas del medio y que esta excitación se transmita al resto de las partículas, para que el sonido se propague. Esta interacción entre las partículas del medio es lo que permite la transferencia de energía de un lugar a otro. Si el sonido se transmite en el aire, una vez que la primera partícula es puesta a vibrar alrededor de su posición de equilibrio, se produce una reacción en cadena, que pone a vibrar a todas las partículas vecinas de las primeras.

La fuente u origen del sonido puede ser cualquier objeto o sistema capaz de hacer vibrar las primeras partículas del medio. Esta puede ser, en el caso de las palabras, las cuerdas vocales de una persona o, en el caso de la música, las coristas conectadas a un equipo musical. Las fuentes de sonido son tan variadas como diversos son los mecanismos que se utilizan para producirlos. Cientos de animales distintos producen las más diversas señales sonoras que los caracterizan. Insectos, aves, peces, reptiles y mamíferos son diferenciados por las innumerables señales audibles, que utilizan para expresarse.



Si se hace el vacío dentro de la campana, el sonido no se escucha en el exterior de la misma.

Como onda mecánica, el sonido no puede propagarse en el vacío, ya que al no existir partículas en el medio, no hay transmisión de energía. En un clásico experimento, se hace el vacío en una campana de vidrio y se pone a sonar un timbre eléctrico en el interior de la misma. La persona al lado de la campana no es capaz de percibir sonido alguno. Tal vez, lo único que notaría es la vibración del soporte sobre el cual reposa la campana.

En el capítulo 13 se mencionó que el sonido es una onda longitudinal. Esto significa que el movimiento de las partículas del medio se produce en una dirección paralela al trans-

porte de energía. Es decir, las partículas del medio vibran paralelamente a la dirección del movimiento del sonido, modificando la densidad de la región donde se propaga. De esta manera, se producen zonas de compresión y de expansión, que indican la variación de la presión en el aire u otro medio donde se propague el sonido.

Un diapasón es un objeto metálico compuesto por dos ramas que al ser golpeado, genera sonido a una frecuencia determinada por las características de su construcción. Cuando un diapasón se pone a vibrar en las cercanías de un tubo lleno de aire tal como se muestra en la fig. 14.1, se observa un patrón de altas y bajas presiones, indicativo de la forma como se propaga la onda de sonido.

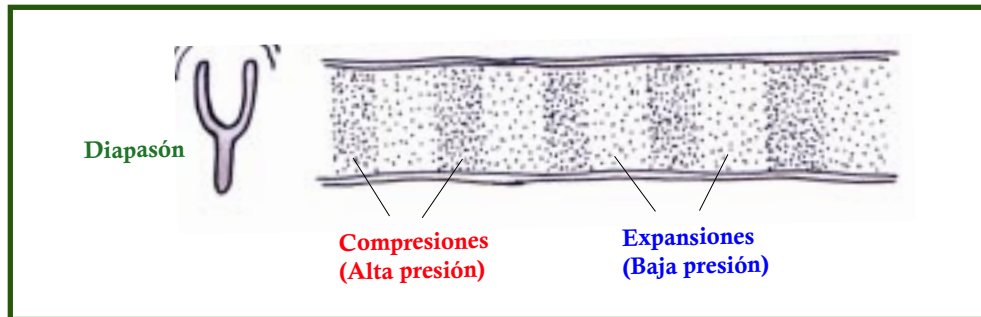


Fig. 14.1 Las vibraciones de un diapasón producen regiones de altas y bajas presiones.

Las ondas de ultrasonido han encontrado las más variadas aplicaciones en la rama de la medicina y en los procesos industriales. La detección del feto, pocas semanas después de la gestación, la destrucción de cálculos renales, la determinación de anomalías cardíacas y en otros órganos del cuerpo humano y la medida del flujo sanguíneo son, entre otras, aplicaciones muy comunes de los ultrasonidos en el área de la salud. En la industria se utilizan cotidianamente ondas ultrasónicas para la detección de grietas en tubos de hierro, para la limpieza de joyas y de piezas metálicas, para la localización de objetos en el fondo de los océanos, para los controles de equipos electrónicos, para los sistemas de alarma y otro gran número de aplicaciones.



Entre las aplicaciones del sonido figura la detección del feto a las pocas semanas de la gestación. Para ello, se usan ondas de ultrasonido de frecuencias cercanas a 2 Mhz.



PIENSA Y EXPLICA



- 14.1 ¿Qué es el sonido? ¿Cuál es su importancia?
- 14.2 ¿Cuál es el rango audible del oído humano?
- 14.3 ¿Qué son ondas infrasónicas y ultrasónicas?
- 14.4 ¿A qué frecuencias pueden oír los perros, los gatos, los murciélagos, los elefantes?
- 14.5 ¿Por qué el sonido no puede propagarse en el vacío?
- 14.6 Ilustra, mediante la figura adecuada, cómo un diapasón modifica las características del aire a su alrededor.
- 14.7 Menciona algunas aplicaciones del ultrasonido.
- 14.8 ¿Por qué el sonido puede considerarse como una onda de presión?
- 14.9 ¿Por qué se dice que el sonido es una onda longitudinal? ¿Por qué se dice que es una onda mecánica?

14.2 FRECUENCIA Y TONO



Cuando una onda de sonido se propaga en el aire, las partículas del medio se mueven en consonancia con la fuente que produce la perturbación, creando expansiones y compresiones como las mostradas en la fig. 14.1. El movimiento de las partículas, hacia delante y hacia atrás, se corresponde con la frecuencia de vibración de la fuente del sonido. Dado que las expansiones y compresiones crean regiones de bajas y de alta presión, un aparato sensible a esta variación de presión puede ser utilizado para detectar la onda de sonido, tal como se ilustra en la fig. 14.2.

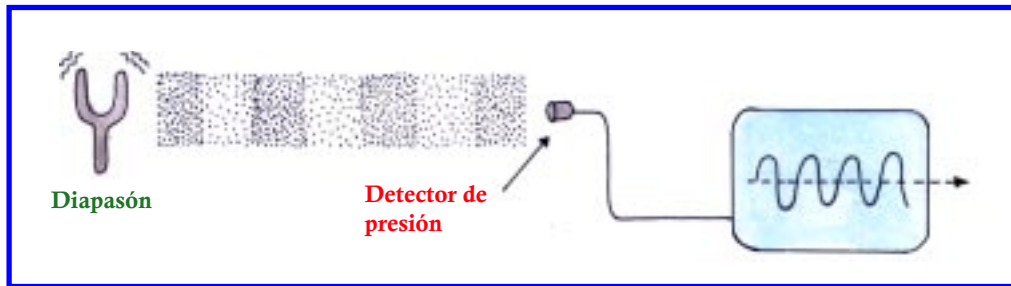


Fig. 14.2 Un detector de presión se utiliza para hacer visible, en un monitor, la onda de sonido generada por el diapasón.

El detector de presión es un accesorio sensible a las variaciones de presión, creadas por la onda de sonido. Estas variaciones son convertidas en impulsos eléctricos, mediante el equipo adecuado, y visualizadas en la pantalla de un osciloscopio. La frecuencia de la onda mostrada en el monitor, se corresponde con la frecuencia de la onda de sonido creada por el diapasón. Entonces la onda de presión, que aparece en el monitor, es representativa de las compresiones y expansiones que experimenta el aire en el punto donde está colocado el detector de presión. Si el diapasón produce ondas sinusoidales, la señal observada en la pantalla del osciloscopio también será sinusoidal.

A la sensación auditiva que produce una onda de sonido y que está relacionada con la frecuencia de la misma, se le conoce con el nombre *tono del sonido*. De acuerdo a esto, un tono alto o agudo corresponde a una frecuencia alta en el rango audible mientras que un tono bajo o grave corresponde a frecuencias bajas.

Hay que hacer notar que el tono es una respuesta fisiológica del cerebro humano a las frecuencias que llegan hasta el oído y, como tal, puede ser interpretado en forma subjetiva por distintas personas. Es interesante mencionar que algunos individuos, entrenados musicalmente, son capaces de detectar frecuencias con diferencia de 2 Hz entre una y otra. Cuando frecuencias distintas se combinan, se producen patrones complejos por la superposición de ondas. Esta interferencia puede dar origen a sensaciones auditivas que podrían resultar agradables o desagradables, dependiendo de las frecuencias que se combinen. Cuando la sensación que se produce es agradable, se habla de *notas consonantes*, mientras que, si la superposición de ondas de sonido produce sensaciones desagradables, se habla de *notas disonantes*. Las notas consonantes constituyen la base de *los intervalos musicales*, que producen sensaciones placenteras al oído. Cuando dos notas musicales tienen frecuencias con una relación 2:1, se habla de una *octava*.



Tal sería el caso de ondas de sonido con frecuencias de 512 Hz y 256 Hz, por ejemplo . Cuando la relación es 5:4, se habla de una *tercera mayor*, como en el caso de 320 Hz y 256 Hz. En la tabla 14.1 se muestran varias relaciones musicales constantes.

Intervalo musical	Relación de Frecuencias	Ejemplos (Hz)
Octava	2:1	512 y 256
Tercera Mayor	5:4	320 y 256
Tercera Menor	6:5	144 y 120
Cuarta	4:3	520 y 390
Quinta	3:2	360 y 240
Tono Mayor	9:8	360 y 320
Tono Menor	10:9	600 y 540

Tabla 14.1 Relaciones musicales consonantes.

14.3 INTENSIDAD DEL SONIDO. EL DECIBEL.

Como ya hemos mencionado anteriormente, una onda de sonido transporta energía. La cantidad de energía que se propaga a través de un medio, cuando tiene lugar una perturbación sonora, depende de la amplitud de vibración de la fuente que produce el sonido. A mayor amplitud de vibración, mayor cantidad de energía que se propaga y más grande la distancia de propagación.

La cantidad de energía transportada a través de un área dada, por unidad de tiempo, se conoce como *intensidad de la onda de sonido*. A mayor amplitud de vibración de la fuente, mayor es la cantidad de energía transportada y, por tanto, más intensa será la onda de sonido. De acuerdo con la definición, podemos escribir:

$$\text{Intensidad} = \frac{\text{Energía/Unidad de tiempo}}{\text{Área}} \quad (14.1)$$

A la cantidad (energía/tiempo) se le conoce con el nombre de *potencia de la onda de sonido* y está íntimamente relacionada con la potencia de la fuente que produce el sonido . En particular, en el caso ideal de que no haya pérdidas por transformación de la energía sónica en calor, la potencia de la onda se mantendrá invariable, a medida que se propaga. De acuerdo a esto último, la intensidad puede expresarse como:

$$\text{Intensidad} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Área}} \quad (14.2)$$

Si denotamos a la intensidad como I , a la potencia como P y al área como A , tendremos:

$$I = \frac{P}{A} \quad (14.3)$$

La unidad de área es el m^2 . La potencia se expresa en unidades de energía por unidades de tiempo (joules/segundos). A tal unidad se le conoce como **Watt**, denotada por la letra W . Entonces, la unidad de intensidad es el Watt por metro cuadrado (W/m^2).

Para tener una idea más clara sobre el significado de la relación (14.2), consideremos la fig. 14.3. Una fuente de sonido, FS, emite una onda que se propaga en un medio tridimensional. A medida que se aleja de la fuente, la perturbación se propaga en forma de un patrón circular, creando zonas de altas y bajas presiones. Las circunferencias, A, B, C, de la fig. 14.3 se corresponden con superficies esféricas, que van aumentando de tamaño según se incremente la distancia a la fuente del sonido. Si se asume que la potencia (energía emitida por la fuente por unidad de tiempo) es constante a lo largo del medio, es lógico pensar que la intensidad es menor cuanto más lejos estemos de la fuente, ya que la energía tiene que repartirse en una superficie esférica de mayor tamaño.

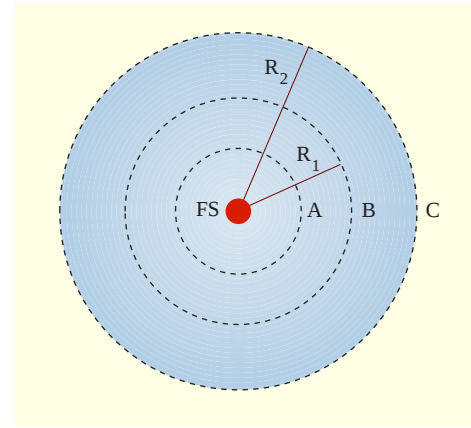


Fig. 14.3 Propagación tridimensional de una onda de sonido. FS es la fuente del sonido.

Si llamamos R_1 y R_2 a las distancias correspondientes a las esferas B y C, las superficies esféricas conexas serán:

$$A_1 = 4\pi R_1^2 \quad A_2 = 4\pi R_2^2$$

Si la energía de la onda es igual en B y C, es decir no hay pérdida de energía, las intensidades en esas superficies esféricas serán:

$$I_1 = \frac{P}{A_1} = \frac{P}{4\pi R_1^2} \quad I_2 = \frac{P}{A_2} = \frac{P}{4\pi R_2^2}$$

Dividiendo las relaciones anteriores:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{P/4\pi R_1^2}{P/4\pi R_2^2} = \frac{R_2^2}{R_1^2} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2$$

Es decir:

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \quad (14.4)$$

Si la distancia desde la fuente a la circunferencia C se hace igual al doble de la distancia, con respecto a la circunferencia B, se tiene:

$$R_2 = 2R_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{R_1}{2R_1}\right)^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} \quad \Rightarrow \quad I_2 = \frac{I_1}{4}$$

Lo que demuestra que la intensidad sobre la superficie esférica, correspondiente a la circunferencia C, se reduce a la cuarta parte de la intensidad sobre la superficie esférica de B. Es decir, al duplicar la distancia de la fuente, la intensidad se reduce a 1/4 de su valor. Si la distancia se triplica (se multiplica por 3), la intensidad disminuye a $(1/3)^2 = 1/9$ de su valor. A la relación matemática entre intensidad y distancia se le conoce como una *relación cuadrática inversa*.

La intensidad del sonido produce en el oído una sensación conocida como *volumen*. El oído humano es muy sensible y es capaz de detectar intensidades tan bajas como $1 \cdot 10^{12} \text{ W/m}^2$. A esa intensidad se le conoce como *umbral de audición*. Para que aprecies la tremenda capacidad de percepción del oído, hay que mencionar que el umbral de audición corresponde a un sonido que desplaza las partículas de aire una distancia de 10^{-12} cm . El sonido más intenso que el oído puede detectar sin sufrir daño físico está alrededor de 1 W/m^2 . A esta intensidad se le conoce como *umbral del dolor*.

La relación entre el umbral del dolor (I_d) y el umbral de audición (I_a) está dada por:

$$\frac{I_d}{I_a} = \frac{1 \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 10^{12} \quad \Rightarrow \quad I_d = 10^{12} I_a$$

Lo que indica que la intensidad en el umbral del dolor es un billón de veces mayor que la intensidad en el umbral de audición.

Como el rango de intensidades que el oído humano es capaz de percibir es muy amplio, usualmente se utiliza una escala llamada *logarítmica*, basada en múltiplos de 10. Esta escala logarítmica se expresa en *decibeles*, que es la unidad más usada para medir la intensidad del sonido. El decibel se abrevia con las letras *db*.

Al umbral de audición se le asigna un nivel de sonido de 0 decibeles (0 db). Es decir,

$1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$ corresponde a 0 db. A un sonido 10 veces más intenso se le asigna un nivel de 10 db. A un sonido que es 100 veces más intenso se le asigna un nivel de 20 db. A un sonido que es 1.000 (10^3) veces más intenso se le asigna un nivel de 30 db. En general, si un sonido es 10^x más intenso que otro sonido, tendrá un nivel de $10x$ más decibeles que el menos intenso. En la tabla 14.2 se indican algunos sonidos comunes y su intensidad en W/m^2 y en db.

Fuente	Intensidad (W/m^2)	Intensidad (db)
Umbral de audición	$1 \cdot 10^{-12}$	0
Susurrar de hojas	$1 \cdot 10^{-11}$	10
Silbido suave	$1 \cdot 10^{-10}$	20
Casa promedio	$1 \cdot 10^{-10}$	20
Conversación normal	$1 \cdot 10^{-6}$	60
Calle con tráfico pesado	$1 \cdot 10^{-5}$	70
Concierto de rock	$1 \cdot 10^{-1}$	110
Taladro neumático	$1 \cdot 10^1$	130
Umbral del dolor	$1 \cdot 10^1$	130
Perforación del tímpano	$1 \cdot 10^4$	160

Tabla 14.2 Intensidad de algunas fuentes comunes de sonido.

Ejemplo 14.1

Un zancudo produce un zumbido de una intensidad equivalente al umbral de audición, a 2 m de una persona. Esto es, el sonido apenas es captado por la persona. ¿Cuántos zancudos se necesitan para que, a esa misma distancia, el sonido escuchado corresponda a una intensidad de un silbido suave?



Solución

El umbral de audición corresponde a $1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$, mientras que un silbido suave tiene una intensidad de $1 \cdot 10^{-10} \text{ W/m}^2$. Para alcanzar esta última intensidad se necesitan:

$$n = \frac{1 \cdot 10^{-10}}{1 \cdot 10^{-12}} = 1 \cdot 10^2 = 100 \text{ zancudos}$$

Ejemplo 14.2

Un sonido, con intensidad de 100 db, se recibe de una fuente situada a 5 m. a) ¿A qué distancia de la fuente la intensidad se reduce a 40 db? b) ¿A qué distancia la intensidad se reduce al umbral de audición?

Solución

La intensidad de 100 db corresponde a 10^{-2} W/m^2 , de acuerdo a lo discutido en esta sección.

a) Una intensidad de 40 db equivale a 10^{-8} W/m^2 , ya que:

$$\frac{10^{-8}}{10^{-12}} = 10^4 \Rightarrow 4 \cdot 10 = 40 \text{ db}$$

Según la relación (14.4):

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$$

Según el enunciado, los valores de I_2 , I_1 y R_1 son:

$$I_2 = 10^{-8} \text{ W/m}^2 \quad I_1 = 10^{-2} \text{ W/m}^2 \quad R_1 = 5 \text{ m}$$

Sustituyendo en la relación anterior:

$$\frac{10^{-8}}{10^{-2}} = \left(\frac{5}{R_2}\right)^2 \Rightarrow \left(\frac{5}{R_2}\right)^2 = 10^{-6} \Rightarrow \frac{5}{R_2} = 10^{-3}$$

$$R_2 = \frac{5}{10^{-3}} = 5.000 \Rightarrow R_2 = 5.000 \text{ m (5 km)}$$

b) El umbral de audición es de $1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2 (I_2)$, por tanto:

$$\frac{10^{-12}}{10^{-2}} = \left(\frac{5}{R_2}\right)^2 \Rightarrow \left(\frac{5}{R_2}\right)^2 = 10^{-10} \Rightarrow \frac{5}{R_2} = 10^{-5}$$

$$R_2 = \frac{5}{10^{-5}} = 500.000 \text{ m} \quad (500 \text{ km})$$



PIENSA Y EXPLICA



- 14.10** ¿A qué se denomina tono de un sonido? ¿Qué son tonos agudos y tonos graves?
- 14.11** ¿Cuál es la diferencia entre tono y frecuencia?
- 14.12** ¿Qué son notas musicales consonantes? ¿Disonantes?
- 14.13** ¿Qué son intervalos musicales?
- 14.14** ¿A qué se llaman intensidad y potencia del sonido?
- 14.15** ¿Por qué la intensidad de una onda de sonido disminuye, a medida que nos alejamos de la fuente que emite el sonido?
- 14.16** ¿Por qué se dice que la intensidad de una onda sonora varía de acuerdo a una relación cuadrática inversa?
- 14.17** En relación con una onda sonora, ¿qué es el volumen? ¿Es igual la intensidad al volumen?
- 14.18** ¿Qué es el umbral de audición? ¿Cuál es su valor para el oído humano?
- 14.19** ¿Qué es el umbral del dolor cuando se habla de ondas sonoras?
- 14.20** ¿Por qué es conveniente expresar la intensidad del sonido en una escala logarítmica? ¿Cómo se expresa esta escala?
- 14.21** ¿A qué valor, en decibeles, corresponde el umbral de audición?



PROBLEMAS



- 14.1** Si la intensidad de un sonido es de 20 db y se triplica a 60 db, ¿cuál es la relación en W/m^2 entre los dos sonidos?
- 14.2** ¿A qué distancia debe estar un punto con respecto a otro, para que la intensidad del sonido se reduzca a $1/4$?
- 14.3** ¿Cuál es la intensidad en db de sonidos con intensidades de $10^2 \text{ W}/\text{m}^2$ y $10^{-9} \text{ W}/\text{m}^2$?
- 14.4** Cuando un zancudo se acerca a nuestros oídos, produce un zumbido de 40 db. ¿Cuál es la intensidad del zumbido en W/m^2 ?
- 14.5** Un observador se encuentra a 15 m de una corneta que emite sonidos.
a) Si se acerca a 5 m de la fuente, ¿cuánto cambia la intensidad del sonido? b) ¿A qué distancia debe alejarse de la fuente para que la intensidad del sonido se reduzca a la tercera parte de la intensidad a 15 m?
- 14.6** Cuando se inserta una cinta en un equipo de sonido, se escucha la música (señal) y un pequeño ruido de fondo. Si dentro de las especificaciones del equipo se dice que su relación señal/ruido es de 60 db, ¿cómo se comparan cuantitativamente la música y el ruido?
- 14.7** Un micrófono se coloca entre dos personas separadas por una distancia de 88 m. Si una de ellas mide una intensidad de 60 db y la otra 80 db, ¿cuál es la distancia del micrófono a cada persona?
- 14.8** Las dos cornetas de un equipo de sonido están colocadas con respecto a un observador, como se muestra en la figura 14.4. Si la corneta A emite 0,5 W y la corneta B 1 W de sonido, ¿qué nivel de intensidad en W/m^2 alcanza al observador?

14.4 TIMBRE DE UN SONIDO

El oído humano es capaz de distinguir sonidos de distintas fuentes, aun cuando dichos sonidos tengan la misma frecuencia fundamental y la misma intensidad. Salvo las ondas de sonidos generadas por un diapasón, que se acercan bastante a ondas sinusoidales

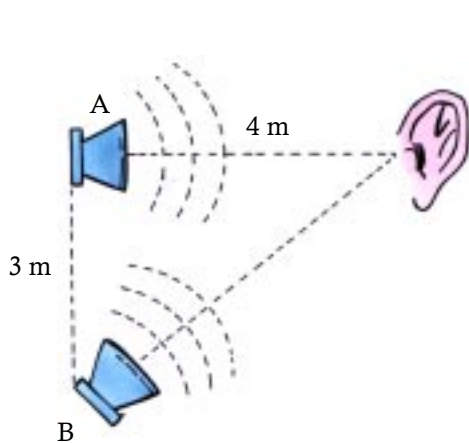


Fig. 14.4 Problema 14.8.

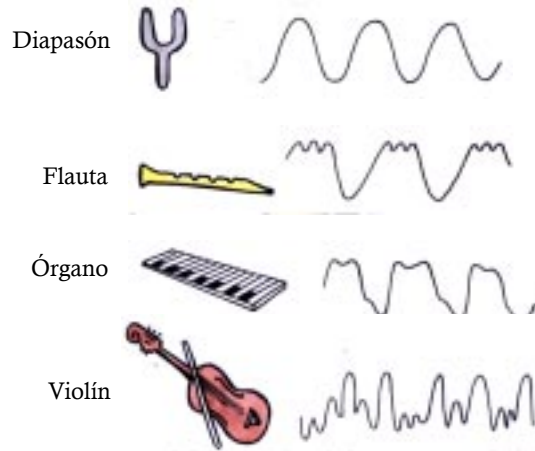


Fig. 14.5 Formas de ondas correspondientes a varios instrumentos musicales.

puras, la mayoría de los instrumentos musicales y otras fuentes de sonido emiten señales complejas. En la fig. 14.5 se muestran algunas formas de ondas, correspondientes a varios instrumentos musicales. Estas formas de ondas son discriminadas por el oído para identificar el instrumento musical. En realidad, el oído "aprecia" la cantidad de armónicos que componen a la compleja onda de sonido para distinguir un instrumento de otro. Esta característica de la fuente de sonido, que permite identificarla, se conoce como *timbre* o *calidad del sonido*.

14.5 RAPIDEZ DEL SONIDO

La rapidez de propagación del sonido depende, básicamente, de dos propiedades del medio: *la densidad* y *la elasticidad*. La densidad es una propiedad inercial, que mide la cantidad de masa en un volumen determinado. A mayor masa en un cierto volumen, mayor restricción habrá para modificar su estado de reposo o de movimiento y menor será la capacidad para transmitir el sonido. Por ejemplo, el sonido en el gas Helio se propaga con una rapidez 3 veces mayor que en el aire, debido a la menor densidad del Helio respecto al aire.

La elasticidad es la habilidad de un material para cambiar su forma, cuando se le aplica una fuerza y volver a su forma original, una vez que cesa la acción de la fuerza. El acero es un material elástico, mientras que la plastilina es un material inelástico. El sonido tiene una rapidez mayor en materiales elásticos en comparación con materiales inelásticos. Debido a la proximidad de los átomos en los materiales elásticos, la energía dentro de los mismos se transmite rápidamente y con pocas pérdidas.

La elasticidad del medio tiene mayor influencia en la rapidez del sonido que la densidad y se cumple:

$$\nu_{\text{Sólidos}} > \nu_{\text{Líquidos}} > \nu_{\text{Gases}}$$

Es decir, la rapidez del sonido es mayor en los sólidos que en los líquidos y que en los gases. La rapidez del sonido en el aire depende tanto de la presión como de la temperatura. La presión del aire afecta la densidad del mismo y, por tanto, su inercia. La temperatura incide sobre las interacciones entre las partículas del medio, haciendo variar su elasticidad. A presión atmosférica normal (760 mm de Mercurio), la rapidez de la onda de sonido, en función de la temperatura, está dada en m/s por:

$$\nu = 331 + 0,6T_c \quad (14.5)$$

Donde T_c es la temperatura en grados Celsius y el valor 331 corresponde a la rapidez de la onda de sonido a 0 °C. Por ejemplo, a 20 °C la rapidez del sonido es:

$$\nu_{20^\circ\text{C}} = 331 + 0,6 \cdot 20 = 343 \text{ m/s}$$

En la tabla 14.3 se muestra la rapidez del sonido en distintos medios de propagación.

La rapidez del sonido es muy alta, si se compara con las actividades cotidianas del hombre que tienen que ver con movimiento. La máxima rapidez alcanzada por el hombre está cercana a 11 m/s y un vehículo a 100 km/h recorre aproximadamente 28 m en 1 segundo. El sonido en el aire recorre ¡343 m en 1 segundo! Esta rapidez, sin embargo, resulta extremadamente pequeña si se le comprara con la rapidez de 300.000.000 m/s de la luz. Por esta razón, primero vemos la luz del relámpago y, luego, escuchamos su sonido característico un tiempo más tarde.

Al igual que cualquier onda, el sonido tiene una rapidez que se relaciona, matemáticamente, con la frecuencia y la longitud de onda, de acuerdo a la ecuación:

$$\nu = \lambda f \quad (14.6)$$

Donde λ es la longitud de onda y f es la frecuencia.

Medio	Rapidez (m/s)
Acero	5.960
Vidrio	5.640
Cobre	5.010
Agua (20 °C)	1.482
Mercurio (20 °C)	1.450
Etanol (20 °C)	1.162
Helio	965
Aire (20 °C)	343
Oxígeno	316

Tabla 14.3 Rapidez del sonido en distintos medios de propagación.

Ejemplo 14.3

Un sonido de 1.000 Hz emitido en el aire pasa de un ambiente de temperatura 22 °C a otro que está a 18 °C. Determina la longitud de onda en ambos ambientes.

Solución

Calcularemos la rapidez del sonido en los dos ambientes , de acuerdo con la relación (14.5):

$$v_{22^{\circ}\text{C}} = 331 + 0,6 \cdot 22 = 331 + 13,2 = 344,2 \text{ m/s}$$

$$v_{18^{\circ}\text{C}} = 331 + 0,6 \cdot 18 = 331 + 10,8 = 341,8 \text{ m/s}$$

Según la relación (14.6):

$$\lambda_{22^{\circ}\text{C}} = \frac{v_{22^{\circ}\text{C}}}{f} = \frac{344,2 \text{ m/s}}{1.000 \text{ ciclos/s}} = 0,344 \text{ m/ciclo}$$

$$\lambda_{18^{\circ}\text{C}} = \frac{v_{18^{\circ}\text{C}}}{f} = \frac{341,8 \text{ m/s}}{1.000 \text{ ciclos/s}} = 0,342 \text{ m/ciclo}$$

14.6 EL OÍDO HUMANO Y LA AUDICIÓN

El oído humano es una estructura compleja, que se ha dividido en tres partes, a los fines de su estudio sistemático. En la fig. 14.6 se muestra un corte transversal del oído. El oído externo está formado por el *pabellón de la oreja* y el *conducto auditivo externo*.

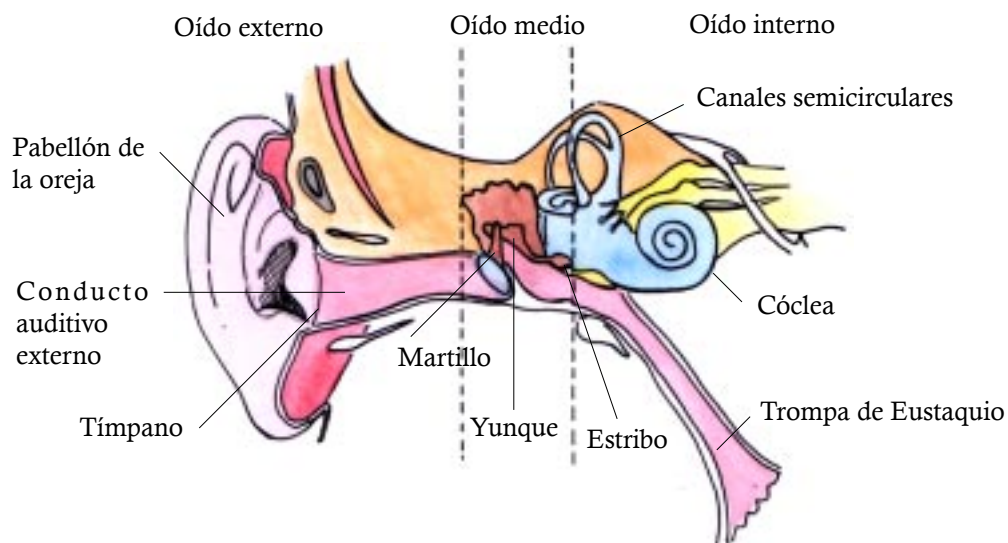


Fig. 14.6 Anatomía del oído humano.

El pabellón de la oreja es una estructura cartilaginosa, protectora del oído y cuyos plie-

gues permiten captar las ondas sonoras, orientándonos en cuanto a la dirección del sonido. El pabellón de la oreja focaliza las ondas sonoras hacia el canal auditivo externo.

El conducto auditivo externo cumple, básicamente, dos funciones: canalizar las ondas de sonido desde el pabellón de la oreja hasta la membrana timpánica y proteger al oído de infecciones. En promedio, el conducto auditivo externo mide unos 3,5 cm de largo y 0,7 cm de ancho. A lo largo del canal existen pelos cortos, glándulas sebáceas y ceruminosas (producen un cierto tipo de cera) que protegen al oído de polvo y microorganismos dañinos. La longitud del canal lo hace resonante a una frecuencia aproximada de 3.400 Hz, lo cual permite que señales de sonido de esa frecuencia, sean captadas con mayor facilidad que otras frecuencias.

El oído medio consta de la *membrana timpánica (tímpano)*, la *cavidad timpánica*, los *huesecillos* y la *trompa de Eustaquio*. La cavidad timpánica está llena de aire y aloja a los huesecillos. En la fig. 14.7 se muestra un corte del oído medio. La membrana timpánica tiene forma ovalada y mide, aproximadamente, 8 mm de ancho por 10 de alto. Su espesor es de 0,1 mm y forma un ángulo de 40° con respecto a un plano horizontal. Bajo la presión de las ondas sonoras, el tímpano vibra a la misma frecuencia de la señal incidente. Dentro de la cavidad timpánica se encuentran los huesecillos: *martillo*, *yunque* y *estribo*, los cuales

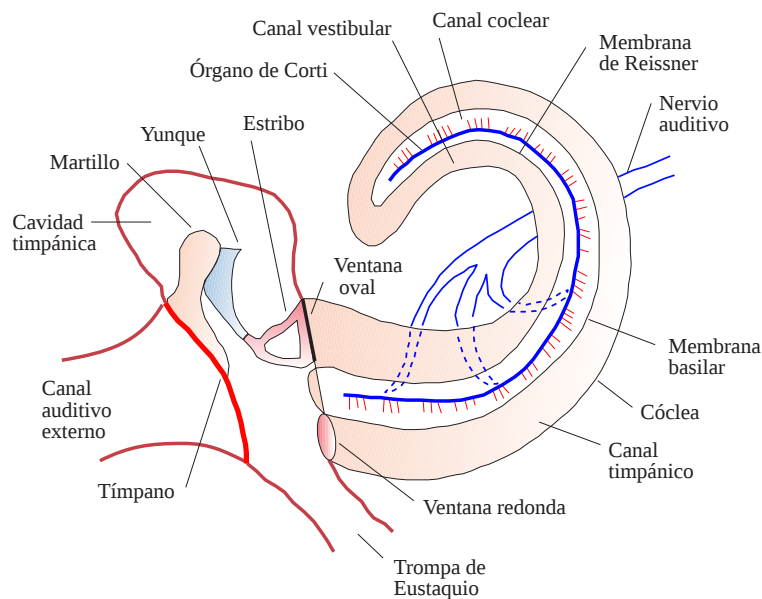


Fig. 14.7 Oído medio y la cóclea

están conectados entre sí y tienen el importante papel de transmitir las vibraciones del tímpano hasta la ventana oval. Su trabajo es tan eficiente que no sólo amplifican la señal sonora, sino que son capaces de modificar su posición, para atenuar aquellos sonidos de alta intensidad que podrían dañar el sistema auditivo.

La *trompa de eustaquio* es un conducto que comunica la cavidad timpánica con la parte

posterior de la boca. Su longitud está alrededor de 3,6 cm y tiene como función básica mantener iguales las presiones en el canal auditivo externo y en la cavidad timpánica, para optimizar el proceso de audición. De esta forma, la membrana timpánica no se ve afectada por presiones diferentes, a ambos lados de la misma. La sensación de tener los "oídos tapados", cuando subimos a cierta altura, es el producto de la diferencia de presión en ambos lados del tímpano. Al bostezar, el aire, a la presión atmosférica, entra por la trompa de Eustaquio hasta el oído medio haciendo que la membrana timpánica adopte la posición conveniente.

En el oído interno se encuentran los *canales semicirculares* y la *cóclea* o *caracol*. Los canales semicirculares (ver fig. 14.6) ayudan a mantener el equilibrio del cuerpo y no tienen función alguna en la percepción auditiva. La cóclea (fig. 14.7) es un órgano en forma de caracol, de unos 3 cm de largo, constituido por 3 conductos llenos de líquidos corporales (perilinfa y endolinfa), en los cuales la energía sonora transmitida por los huesecillos se convierte en vibraciones. Dos de esos canales, *el canal vestibular* y *el canal timpánico* están conectados en uno de sus extremos. El *canal coclear* se encuentra entre ellos. El canal vestibular está conectado al oído medio, mediante una membrana llamada *ventana oval*, contra la cual golpea el estribo bajo efectos del sonido. El canal timpánico termina en una membrana denominada *ventana redonda*.

El canal coclear y el canal vestibular están separados por una membrana muy fina llamada *membrana de Reissner* y entre el canal timpánico y el coclear existe otra membrana mucho más gruesa, denominada *membrana basilar*. Esta última membrana es sostén del *órgano de Corti*, sobre el cual descansan células ciliadas (parecidas a pelos cortos), cuya función es vibrar de acuerdo con la excitación sonora y convertirla en impulsos eléctricos, que son llevados al cerebro por medio del nervio auditivo para producir la sensación de sonido. Las células ciliadas difieren en longitud por cantidades muy pequeñas y presentan distintas sensibilidades al movimiento que la endolinfa produce en ellas. Cuando una onda sonora llega a los canales vestibular y timpánico, se originan ondas en el líquido que contiene (perilinfa), causando el movimiento de las células ciliadas. Cada célula tiene una sensibilidad natural a una determinada frecuencia de vibración. Cuando la frecuencia de la onda corresponde a la frecuencia natural de vibración de una célula ciliada, ésta se excita a su máxima amplitud, dando origen a un impulso nervioso, representativo de su frecuencia natural. En un mecanismo hasta ahora no completamente establecido, el cerebro interpreta las características de la onda sonora que llega al oído.

14.7 INTERFERENCIA Y BATIDOS

Como hemos estudiado, la interferencia es un fenómeno que se produce cuando dos o más ondas se encuentran en un medio. La *interferencia constructiva* refuerza el efecto de las ondas que se encuentran, mientras que la *interferencia destructiva* disminuye o cancela el efecto de dichas ondas.

Como cualquier tipo de onda, las ondas de sonido pueden también interferir entre si. Ya sabemos que las ondas sonoras crean regiones de expansión y de compresión de las partículas de aire. Si dos ondas de sonido producen expansiones y compresiones en los mismos puntos y al mismo tiempo, en una determinada región del espacio, se origina una interferencia constructiva. Si, por el contrario, una onda produce expansión, mientras la otra produce compresión en el mismo punto y al mismo tiempo, se origina una interferencia destructiva. En la fig. 14.8 se muestran los dos casos. En la fig. 14.8(a) las ondas se refuerzan, mientras que en la fig. 14.8(b) el efecto de las ondas se debilita.

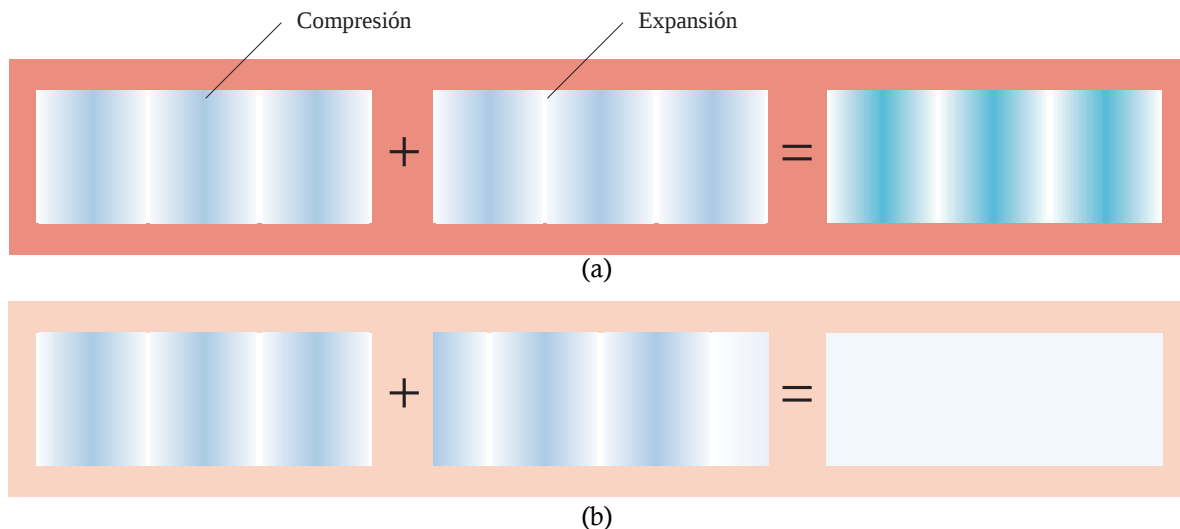


Fig. 14.8 Interferencia de dos ondas de sonido: a) Constructiva. b) Destructiva.

La interferencia afecta el volumen de los sonidos. En gimnasios y teatros, con malos diseños acústicos, pueden observarse fenómenos de interferencia, que crean zonas de baja recepción.

La interferencia de sonidos tiene una amplia aplicación en la música. En general, la música es una mezcla de sonidos, cuyas frecuencias guardan entre sí una relación "simple" de números enteros, como 2:1, 3:2, 5:4 etc. La diferencia básica con el ruido, es que, en éste, la mezcla de frecuencias no tiene una "clara" relación matemática. En el caso de la música se genera un patrón de onda regular y repetitivo, mientras que el ruido presenta un patrón irregular y no repetitivo. En la fig. 14.9 se muestra el patrón de interferencia para ondas de sonido cuya relación de frecuencia es 2:1 y cuando esta relación es 37:20.

Un aspecto curioso del sonido, y de mucha aplicación en la música, es lo que se conoce como *batidos*. Los batidos son patrones de interferencia que se producen cuando dos ondas de sonido, con pequeñas diferencias de frecuencia, interaccionan. Cuando esto sucede, se oye una combinación de sonidos: el volumen aumenta, luego se desvanece, aumenta, se desvanece y así sucesivamente. En la fig. 14.10 se muestra el patrón de interferencia, resultante de dos ondas de frecuencias muy cercanas entre sí.

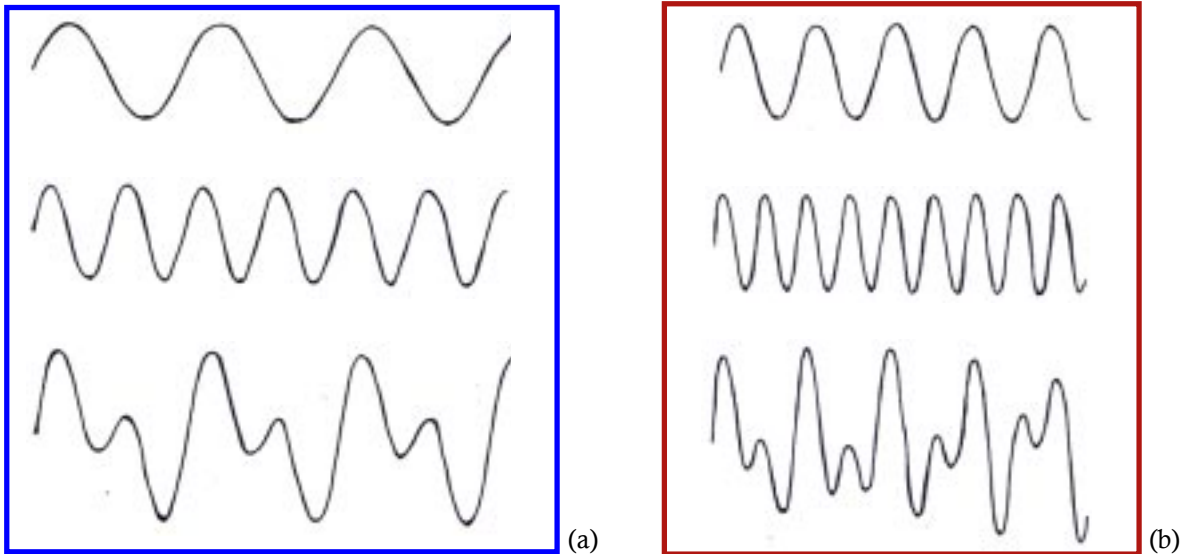


Fig. 14.9 En el caso de ondas musicales, éstas pueden superponerse para generar sonidos agradables (a) o ruido (b).

El patrón de batido se caracteriza por una onda que, periódicamente, cambia desde una amplitud igual a cero hasta un máximo. Cuando la interferencia es constructiva, se oye un sonido de alto volumen, que coincide con un pico de la onda. Cuando tiene lugar interferencia destructiva, no se oye sonido alguno y esto se corresponde con un valle de la onda resultante. Los cambios periódicos sucesivos son percibidos por el oído como variaciones de volumen.

La *frecuencia de batido* es aquella a la cual el volumen del sonido se escucha variando de baja a alta intensidad o vice versa. La frecuencia de batido es siempre igual a la diferencia de frecuencias de las ondas, que interfieren para producir los batidos. Así, por ejemplo, si un sonido tiene una frecuencia de 440 Hz y la otra de 442 Hz, la onda de batido resultante tendrá una frecuencia de 2 Hz. A menudo, los músicos utilizan los batidos para afinar sus instrumentos musicales. Cuando ellos comparan la nota del instrumento a afinar con un sonido de frecuencia conocida y correspondiente a la nota a emitir por dicho instrumento y escucha batidos, inmediatamente se percata que no está afinado. Cuando el batido desaparece, el instrumento está listo para ser usado.

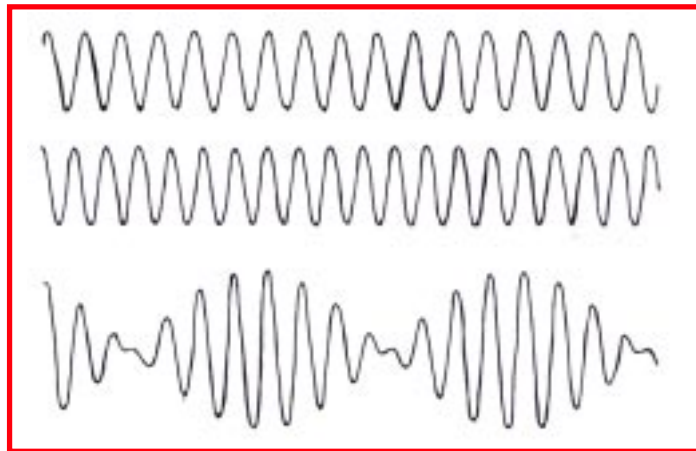


Fig. 14.10 Batidos producidos por la interferencia de ondas con frecuencias ligeramente distintas.



PIENSA Y EXPLICA



- 14.22** ¿A qué se llama timbre o calidad de un sonido?
- 14.23** En referencia a la fig. 14.5 ¿cómo distingues una señal de sonido pura de una compleja?
- 14.24** ¿Qué relación cualitativa hay entre una onda y sus armónicos?
- 14.25** ¿De qué propiedades depende la rapidez de propagación del sonido en un determinado medio?
- 14.26** ¿Por qué se dice que la densidad es una propiedad inercial del medio?
- 14.27** ¿Por qué el sonido se propaga más rápido en el Helio que en el aire?
- 14.28** ¿Qué es la elasticidad de un medio?
- 14.29** Explica con detalles el proceso de audición.
- 14.30** ¿Cómo el oído discrimina entre sonidos de distintas frecuencias?
- 14.31** Explica las interferencias constructiva y destructiva de ondas sonoras.
- 14.32** ¿Qué diferencia sensitiva y matemática hay entre un sonido musical y el ruido?
- 14.33** Algunos insectos baten sus alas, sin que se pueda percibir sonido alguno. ¿Por qué sucede esto?
- 14.34** En relación con las ondas sonoras, ¿qué son los batidos? ¿Cómo son percibidos por el oído? ¿Cómo se relacionan con la interferencia de ondas?
- 14.35** Explica qué es la frecuencia de batido en ondas sonoras.
- 14.36** ¿Cómo se utilizan los batidos para afinar instrumentos musicales?

**PROBLEMAS**

- 14.9** Un fanático del beisbol observa que un bateador golpea la pelota y escucha el sonido 0,30 segundos después. Si la temperatura ambiente es de 28°C , ¿a qué distancia, aproximadamente, se encuentra el receptor del fanático?
- 14.10** Las ondas de ultrasonido se usan, comúnmente, en medicina con fines de diagnóstico. Cuando esas ondas se transmiten en un paciente, se propagan en músculos, a una velocidad de 1.000 m/s y en huesos, a una velocidad de 3.000 m/s . Si la frecuencia usada es de $2,2\text{ MHz}$, determina la longitud de onda en ambos tejidos orgánicos.
- 14.11** Cuando se utilizan ondas de ultrasonido como procedimiento para limpiar objetos sumergidos en soluciones acuosas, es necesario que la longitud de onda emitida esté en el rango de la medida de las partículas que están en esas soluciones. Si estas partículas limpiadoras miden en promedio $3 \cdot 10^{-2}\text{ cm}$, ¿cuál debe ser la frecuencia del ultrasonido?
- 14.12** En una manifestación de la capacidad de predadora del ser humano, una persona lanza una carga explosiva a un río, con el fin de matar peces. Aguas abajo, un grupo de excursionistas oye la explosión. Unos, sumergidos en el agua, la escuchan 5 s antes que quienes están en la orilla del río. Si la temperatura del aire es de 25°C , ¿a qué distancia tuvo lugar la explosión?

14.8 EFECTO DOPPLER Y ONDAS DE CHOQUE

El *efecto Doppler* es un fenómeno que se observa cada vez que una fuente de ondas se está moviendo con respecto a un observador. Este efecto tiene lugar con cualquier tipo de onda, pero en esta sección haremos énfasis en su ocurrencia en ondas de sonido.

En nuestra vida cotidiana notamos que cuando un vehículo policial o una ambulancia, con su sirena activada, se dirige hacia nosotros, emitiendo un sonido, la frecuencia del mismo parece mayor en relación con la frecuencia que captamos si el vehículo se estuviera alejando de nuestro punto de observación.

El efecto Doppler puede describirse como el aumento o la disminución aparente en la frecuencia de una fuente de sonido que un observador detecta, cuando ésta se acerca o se aleja del mismo. A medida que la velocidad de la fuente aumenta, más notable es el efecto Doppler.

En general, cada vez que existe un movimiento relativo entre una fuente de sonido y un observador, la frecuencia del sonido es captada por el observador como un tono mayor o menor que el emitido por la fuente, cuando no hay movimiento relativo (fig. 14.11).

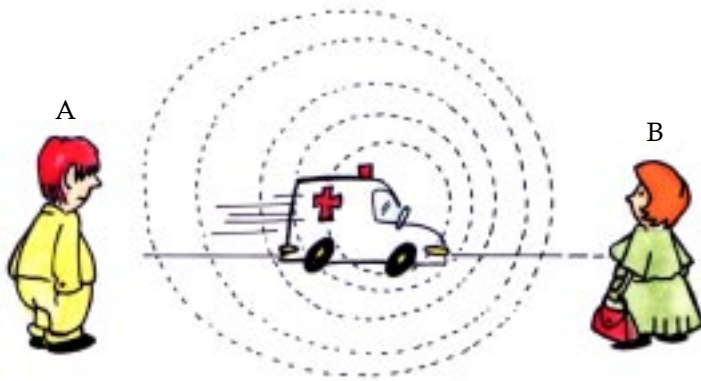


Fig. 14.11 Debido al efecto Doppler, el observador B escucha un sonido de mayor frecuencia que el observado A.

El efecto Doppler es usado en medicina, entre otras aplicaciones, para determinar la velocidad de la sangre. Para ello, se envían ondas de ultrasonido hacia los vasos sanguíneos y la onda reflejada, cuya frecuencia es modificada por el movimiento sanguíneo, permite calcular la velocidad del flujo de la sangre.

El efecto Doppler se observa cuando la velocidad de la fuente es menor que la velocidad de la onda de sonido. Sin embargo, si la velocidad de la fuente supera en magnitud a la del sonido, se produce otro tipo de fenómeno. Se dice, en este caso, que la velocidad es *supersónica*. Esta velocidad se designa como *número Mach*, que es la razón entre la velocidad del objeto y la del sonido. Un cuerpo que viaje a Mach 2, por ejemplo, tiene una velocidad cuya magnitud es el doble de la del sonido.

Si un avión sobrepasa la velocidad del sonido, se produce una *onda de choque* o *estampida sónica*, que puede oírse en la superficie terrestre al pasar el avión. Esta onda de choque se forma al apilarse, en interferencia constructiva, un gran número de frentes de ondas, originándose zonas de muy alta presión.

14.9 REFLEXIÓN, REFRACCIÓN Y DIFRACCIÓN DEL SONIDO

Similar a lo que sucede con cualquier tipo de onda, el sonido puede reflejarse, o sufrir refracción o difracción, cuando encuentra un obstáculo. La reflexión de ondas de sonido cuando alcanzan una superficie en su trayectoria, puede dar lugar a dos fenómenos interesantes: *el eco* y *la reverberación*. Los ecos se perciben cuando una onda de sonido emitida por una fuente, se refleja en un obstáculo y es captada por el oído un tiempo mayor de 0,1

segundos, después que el sonido original salió de la fuente . Muy familiar nos resulta pararnos enfrente de una montaña, emitir un grito y esperar el rebote del sonido para oír nuestra propia voz.

El sonar es un instrumento utilizado para determinar la profundidad en mares y océanos basado en el sonido reflejado en el fondo rocoso o arenoso . Algunos animales, como murciélagos y guácharos, emiten señales sonoras y utilizan su eco para orientarse en la oscuridad.

La reverberación es una reflexión múltiple del sonido en espacios cerrados, cuyas dimensiones (alto, ancho y largo) no superen los 17 metros . ¿Por qué 17 metros? El cerebro humano mantiene el sonido en su memoria por un tiempo de 0,1 segundos Si una onda de sonido reflejada alcanza al oído dentro de 0,1 segundos del sonido inicial, la persona lo percibe como si fuera un sonido continuo. Como las perturbaciones sónicas viajan a unos 340 m/s, en 0,1 s cubrirán una distancia de 34 m. Esto es, 17 m en el viaje de ida y 17 m cuando se refleja.

Aun cuando la reverberación puede producir efectos auditivos o musicales indeseables en espacios cerrados, cuando la sala está mal diseñada desde el punto de vista acústico si el proyecto arquitectónico se hace, atendiendo a normas de diseño correctas, la sensación sonora se hace placentera.

La *refracción* de las ondas de sonido se produce cuando tiene lugar un cambio de dirección de las mismas, al pasar de un medio a otro distinto. La refracción está acompañada de un cambio tanto en la velocidad como en la longitud de onda. Así, si la onda de sonido pasa del aire al agua, su velocidad aumenta de 340 m/s a 1.482 m/s.

La *difracción* (fig. 14.12) ocurre cuando el sonido se hace notar alrededor de obstáculos y aberturas, de la misma forma como se discutió en el capítulo anterior.



Fig. 14.12 Difracción de ondas de sonido.

14.10 RESONANCIA Y ONDAS ESTACIONARIAS

Cualquier objeto, cuando se somete a un golpe o a una perturbación, comienza a vibrar. Cuando se golpea una campana o se pulsa una cuerda de un cuatro o de una guitarra, éstas vibrarán a una frecuencia específica, denominada *frecuencia natural* o *frecuencia de resonancia* del objeto que se excita. Todos los objetos tienen una frecuencia natural o un conjunto de frecuencias a las cuales vibran. Cuando son excitados por una perturbación externa, tienden a vibrar a esas frecuencias características.

Algunos objetos, como, por ejemplo, la flauta, vibran a una frecuencia de resonancia, produciendo un tono musical casi puro. Otros instrumentos musicales producen dos o más ondas, cuyas frecuencias están relacionadas de tal forma que su sensación es agradable al oído. En otros casos, las frecuencias naturales de vibración no están relacionadas armoniosamente y se originan en el oído sensaciones desagradables que, usualmente, se identifican como ruido. Por ejemplo, cuando se desliza un pupitre construido de madera y metal en un salón de clases, se produce un ruido muy desagradable.

Las frecuencias de resonancia de un objeto dependen de varios factores. La relación entre la frecuencia, f , la longitud de onda, λ , y la velocidad (v) de propagación de una onda está dada por:

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

El cuatro, por ejemplo, es un instrumento musical de 4 cuerdas diferentes, cuya tensión, grosor y longitud determinan la frecuencia de vibración. El grosor determina la densidad de la cuerda. La tensión y la longitud pueden ser controlados por el músico, mientras que el grosor de las cuerdas lo fija el fabricante de las mismas. La velocidad de la onda depende de las propiedades del medio: la tensión y densidad lineal de las cuerdas, mientras que la longitud de onda es controlada por quien toca el cuatro, colocando sus dedos en los puntos apropiados sobre las cuerdas. De esta forma, produce las frecuencias correspondientes a los distintos tonos musicales (fig. 14.13).



Fig. 14.13 El cuatrista genera distintas frecuencias, de acuerdo a la posición de sus dedos sobre la cuerdas.

La generación de ondas estacionarias fue discutida en el capítulo 13, en forma general. En el caso de las ondas de sonido, la formación de ondas estacionarias es evidente en instrumentos musicales, bien sean estos de cuerda, de viento o de percusión. Recordemos que las ondas estacionarias se forman cuando las ondas se reflejan, creando patrones de interferencia a lo largo del medio de propagación, en los cuales se aprecia la formación de nodos y antinodos. Aunque los objetos pueden vibrar a distintas frecuencias, sólo modos de vibración específicos pueden establecerse con relativa facilidad. Si se trata de una cuerda vibrante, la fig. 14.14 muestra algunos modos posibles de vibración.

Cada patrón de onda estacionaria está asociado con una de las frecuencias naturales de vibración de la cuerda, a las cuales se les denomina *armónicos*. Al primer armónico se le conoce también con el nombre de *frecuencia fundamental*. Los patrones de onda estacionaria sobre la cuerda fija en sus extremos, se caracterizan por lo siguiente:

1. Hay un patrón alter nante de nodos y antinodos.
2. En los dos e xtremos fijos de la cuerda siempre hay nodos.
3. Entre los extremos hay siempre ondas completas o, un número de ondas completas, más la mitad de una onda.

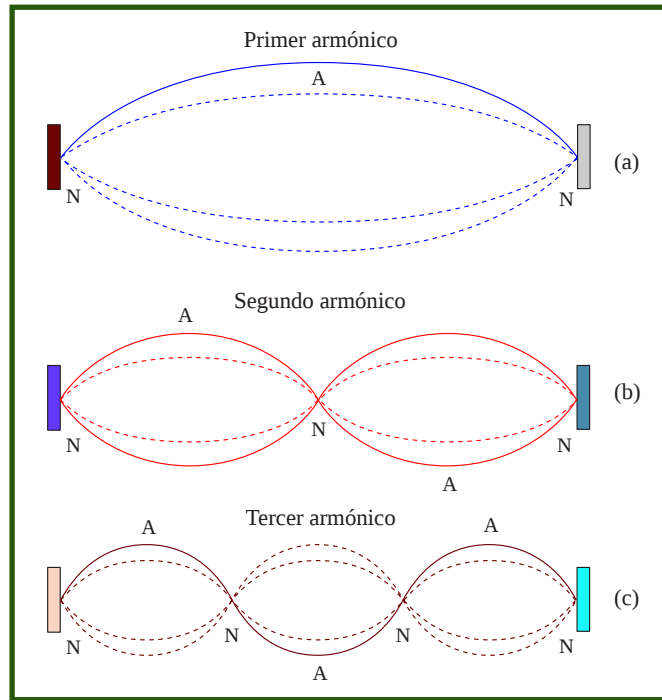


Fig. 14.14 Ondas estacionarias en una cuerda que vibra. Las letras N y A indican los nodos y antinodos, respectivamente.



PIENSA Y EXPLICA



- 14.37** Describe el efecto Doppler.
- 14.38** ¿Cambia la frecuencia de la fuente emisora en el efecto Doppler?
- 14.39** ¿Qué es una velocidad supersónica? ¿Cómo se le designa?
- 14.40** ¿Qué es una estampida sónica?
- 14.41** ¿Qué es el eco? Cita algunos ejemplos de su utilización.
- 14.42** ¿Qué es la reverberación? ¿Qué tiene que ver la distancia de 17 m en este fenómeno?
- 14.43** ¿Qué son la refracción y la difracción de ondas sonoras?

- 14.44** ¿Qué es la frecuencia natural o de resonancia de un objeto?
- 14.45** ¿Qué factores determinan las frecuencias de resonancia de un objeto?
- 14.46** En las cuerdas de una guitarra, ¿cómo se controla la frecuencia de resonancia?
- 14.47** Explica la formación de ondas estacionarias en las cuerdas de un cuatro. Usa dibujos apropiados, donde hagas notar la presencia de nodos y antinodos.
- 14.48** ¿Por qué en los extremos fijos de una cuerda se producen nodos al pulsarla?
- 14.49** ¿Cuál es la función de las válvulas de una trompeta?
- 14.50** ¿Qué sucedería con la frecuencia de resonancia del aire dentro de una trompeta si se aumenta la temperatura del aire en el interior de la misma?
- 14.51** ¿Por qué una habitación vacía da una sensación auditiva completamente distinta a la misma habitación con muebles en su interior?



Las estampidas sónicas se producen cuando se supera la velocidad del sonido.

CAPÍTULO 15



La Luz

Desde los antiguos griegos, el género humano ha combinado el conocimiento de los fenómenos naturales con el razonamiento lógico para descifrar la interacción del hombre con el medio ambiente. Como la luz juega un papel de primera línea en la conciencia del mundo que nos rodea, no es de extrañar que las preguntas sobre su naturaleza hayan ocupado, junto con las leyes de la Mecánica, la estructura del universo y el comportamiento de los cuerpos celestes, un lugar privilegiado en la mente del estudioso de los fenómenos físicos. Sin embargo, la naturaleza de la luz mostró ser un problema más complicado que los que antes había enfrentado el hombre.

La luz es fundamental para la presencia de la vida en el planeta Tierra. La función clorofílica de las plantas, por ejemplo, da lugar a una serie de procesos encadenados sin los cuales dudaríamos de la factibilidad de la especie humana. El desarrollo de la civilización, la comunicación sensorial y un sin número de aspectos triviales de la actual vida comunitaria, serían imposibles sin la presencia de la luz.

15.1 ¿QUÉ ES LA LUZ?

La naturaleza de la luz ha intrigado a los estudiosos de los fenómenos físicos durante cientos de años. Algunos antiguos filósofos griegos pensaban que la luz estaba constituida



La luz es fundamental para la presencia de la vida en el planeta Tierra.



por partículas muy pequeñas, que emanaban de los objetos y penetraban en el ojo para crear la sensación de visión. Otros, entre quienes estaban Sócrates y Platón, sostenían que la luz consistía de un torrente de filamentos emitidos por el ojo que chocaban contra los objetos y permitía observarlos. Para soportar esta afirmación, Euclides, haciendo uso del pensamiento lógico que dominaba la época, decía que un objeto pequeño sobre el piso sólo podía verse cuando nuestros ojos se enfocaban hacia él.

A esta concepción de que la luz consistía de partículas, Empédocles, también filósofo griego, aparecía como una voz disidente: en lugar de pensar que la luz era consecuencia de la propagación de partículas (*teoría corpuscular*), consideraba que la misma se propagaba como una onda (*teoría ondulatoria*).

La teoría inicial de la luz, como partículas que emanaban de la fuente de luz o del ojo fue desechada, ya que no podía explicar por qué los objetos no podían verse en la oscuridad: en este caso, ¿qué se hacían las partículas?

Durante el siglo XVII, se hicieron esfuerzos considerables para intentar modelos sobre la naturaleza de la luz, que pudieran explicar el comportamiento experimental de los fenómenos asociados a su propagación, en particular la reflexión y refracción de la misma. Renace, así, la teoría corpuscular, respaldada por varios científicos, incluyendo la voz autorizada de Newton.

De acuerdo a Newton, el Sol y otros cuerpos incandescentes emiten corpúsculos muy livianos, que poseen una alta velocidad y se mueven en línea recta. Según esta teoría, la cantidad de partículas emitidas era proporcional a la intensidad de la fuente y la reflexión de la luz ocurría cuando los corpúsculos chocaban contra una superficie y se devolvían al mismo medio, cambiando su dirección de acuerdo al ángulo de incidencia.

La refracción de la luz tiene lugar cuando atraviesa medios de distintas densidades. De acuerdo con la teoría corpuscular, si la luz pasa de un medio dado a otro más denso, los

corpúsculos son atraídos por la masa del medio de mayor densidad, haciendo que su velocidad aumente. Esta última deducción lógica fue echada por tierra, posteriormente, mediante resultados experimentales, lo que condujo a cuestionar la teoría corpuscular. La teoría corpuscular, además, se sustentaba en la observación en torno a que la luz parecía viajar en línea recta, en lugar de curvarse en los obstáculos tal como lo hacen las ondas de sonido.

En 1690, el físico holandés Christian Huygen proporciona evidencias de que la luz se difractaba alrededor de obstáculos, tal como lo hacía cualquier onda. Los científicos posteriores a Huygens encontraron fuertes evidencias a favor de la teoría ondulatoria de la luz. En 1850, el físico francés Foucault demostró, experimentalmente, que la velocidad de la luz en el agua era menor que en el aire, convirtiendo a la teoría ondulatoria en una herramienta ampliamente aceptada.

Quedaba por dilucidar cuál era el medio donde la luz se propagaba. Así como las ondas de sonido se propagaban en un medio físico (el aire, el agua, etc.), debería existir un medio donde se propagasen las ondas de luz. El hecho de que la luz se transmitiera en el vacío interestelar no parecía tener consistencia lógica para los físicos de la época, ya que en el vacío no hay partículas que puedan vibrar. Esto llevó a pensar que en el vacío existía una sustancia, a la cual se denominó *éter*, que permitía la propagación de la luz.

En 1860, el físico escocés Maxwell, mediante consideraciones matemáticas teóricas, establece que las ondas de radio y de la luz eran ondas electromagnéticas, que sólo se diferenciaban en su frecuencia.

La idea del éter fue descartada a principios del siglo XX, cuando Einstein justificó la propagación de la luz en el vacío. Einstein introdujo, además, la idea de que la luz se propagaba por paquetes de partículas, a las cuales denominó *fotones*, volviendo a plantear, de esta manera, su naturaleza corpuscular. Se basaba este eminente físico en la proposición de Max Planck, según la cual la luz viajaba en pequeños paquetes de energía, conocidos como *cuantos*. La explicación del llamado efecto fotoeléctrico mediante los fotones llevó a Einstein a recibir el premio Nobel, en 1921.

Actualmente, se acepta la llamada dualidad onda-partícula para explicar el comportamiento de la luz: es decir, la luz se comporta algunas veces como onda y otras como partícula.

En 1924, el físico francés de Broglie es, también, galardonado con el premio Nobel, al combinar la teoría ondulatoria con la teoría corpuscular. Algunos de los fenómenos luminosos son descritos, adecuadamente, mediante la teoría ondulatoria, mientras que otros requieren el enfoque de la teoría cuántica. Se dice, entonces, que la luz exhibe *una dualidad onda – partícula*.



15.2 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

En la naturaleza existe un amplio rango de fenómenos que poseen características ondulatorias. Las ondas electromagnéticas, llamadas así por exhibir manifestaciones eléctricas y magnéticas, constituyen la llamada *energía radiante* y comprenden desde ondas de corriente eléctrica alterna de baja frecuencia (60 Hz) hasta los rayos cósmicos, de frecuencias extremadamente altas. A la representación gráfica de la energía radiante, en términos de la frecuencia o de la longitud de onda, se le conoce con el nombre de *espectro electromagnético*, cuyo aspecto se muestra en la fig. 15.1.

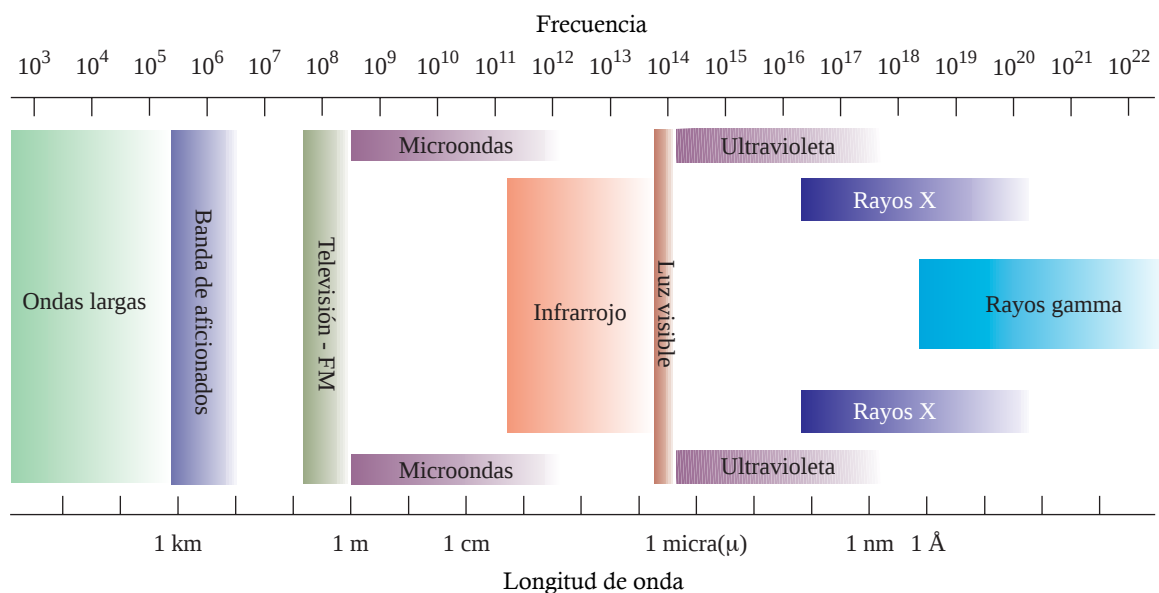


Fig. 15.1 El espectro electromagnético

Las líneas divisorias entre los distintos tipos de energía radiante no son tan pronunciadas, como puede verse en la fig. 15.1. Por el contrario, hay una transición gradual entre una zona del espectro y otra. Tradicionalmente, se utilizan longitudes de onda para describir la energía radiante, que está a la izquierda de la línea divisoria, entre infrarrojo y microondas, mientras que la energía radiante, a la derecha de esta línea divisoria, se expresa en función de la frecuencia. Por ejemplo, una estación de radio se designa en términos de su frecuencia: 1.500 KHz (AM), 100,3 MHz (FM), mientras que la radiación correspondiente a la luz verde se asocia con longitudes de onda entre 560 nm y 490 nm (recuerda que $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Las longitudes de ondas más largas y frecuencias más bajas están ubicadas en el extremo izquierdo del espectro, mientras las longitudes de onda más cortas y frecuencias más altas están en el extremo derecho.

A pesar de que el espectro electromagnético tiene un rango muy amplio, el ojo humano es sensible sólo a una banda estrecha de frecuencias, que recibe el nombre de *espectro visible de luz*. Entonces, cuando nos referimos a "la luz", estamos hablando del tipo de

onda electromagnética, que es capaz de estimular la retina del ojo. El espectro visible de luz tiene un rango de frecuencia que va desde el color rojo hasta el color violeta. El color rojo corresponde, aproximadamente, a una longitud de onda de 760 nm, mientras que el violeta tiene una longitud de onda aproximada de 380 nm. Entre ambas longitudes de onda existe una gama infinita de colores que el ojo puede percibir. A continuación, hacemos una breve descripción de las ondas que comprenden el espectro electromagnético.

Ondas de corriente alterna: normalmente tienen que ver con la energía eléctrica que alcanza nuestros hogares a 110 y 220 voltios. Su frecuencia es de 60 Hz en la mayoría de los países, que corresponde a una longitud de onda de aproximadamente, 5.000 km.

Ondas de radio: se utilizan, mayormente, en la radio AM y FM, y en la televisión.

Microondas: con longitudes de ondas de valores típicos entre 1 mm y 30 cm, estas ondas se utilizan en sistemas de comunicaciones por radar y en las actuales tecnologías de telefonía celular. Los hornos de microondas, tan comunes en nuestros hogares, constituyen una aplicación de la energía de las ondas para calentar o cocinar alimentos.

Ondas infrarrojas: como su nombre lo indica, se encuentran por debajo de la luz roja en el espectro electromagnético. Sus longitudes de onda están entre 1 mm y $7 \cdot 10^{-7}$ m. Debido a su capacidad para generar calor en las sustancias sobre las cuales actúa, se utiliza en terapias térmicas. La fotografía infrarroja es otro campo de aplicación de estas ondas.

Ondas ultravioletas: con longitudes de onda entre 380 nm hasta 60 nm, la luz ultravioleta es la causa principal de las quemaduras provocadas por exposición solar y un agente a tener en cuenta en el cáncer de piel. La capa de Ozono de la atmósfera sirve de barrera a la mayor parte de la luz ultravioleta, protegiendo al planeta Tierra de los efectos nocivos de la misma. De allí los actuales esfuerzos por prohibir el uso de componentes químicos que, como los clorofluorcarbonos, destruyen la capa de ozono.

Rayos X: se han utilizado por mucho tiempo en medicina para revelar las estructuras internas del cuerpo humano. Tienen longitudes de onda entre 10 nm y 10^4 nm. Por su poder de penetración y destrucción, deben ser usados con mucha cautela cuando son prescritos en la terapia contra el cáncer.

Rayos gamma: son ondas electromagnéticas emitidas por núcleos radiactivos como el Cobalto (^{60}Co) y el Cesio (^{137}Cs) y en algunas reacciones nucleares. Sus longitudes de onda varían entre 0,1 nm hasta 0,00001 nm.

15.3 LA RAPIDEZ DE LA LUZ

Los antiguos filósofos griegos creían que la luz se propagaba instantáneamente. Descartes, filósofo francés, fue uno de los primeros que asomó la posibilidad de que la luz se propagaba con rapidez finita. La rapidez, c , de la luz en el aire es tan grande ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s) que resultaron infructuosos los primeros intentos para medirla.



La rapidez de la luz es tan grande que, sólo en 0,13 segundos, un rayo de luz podría dar una vuelta a la Tierra.

Galileo trató de medir la rapidez de la luz, colocando a dos observadores separados una distancia determinada. Dichos observadores, provistos de relojes, deberían encender luces y medir el tiempo transcurrido. Debido a la enorme rapidez de la luz, los resultados fueron negativos, tal como, acertadamente, lo reconoció Galileo.

Esfuerzos posteriores, que implicaron a muchos científicos, dieron como resultado un valor muy cercano a 300.000 km/s ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s), el cual es hoy aceptado como término medio de la rapidez de la luz en el aire o en el vacío. Este valor es tan grande que, en sólo 0,13 segundos, un rayo de luz podría dar una vuelta a la Tierra.

La rapidez de la luz varía según el medio donde se propague. Por ejemplo, la luz se propaga en el agua con una rapidez de $2,25 \cdot 10^8$ m/s.

15.4 RAYOS DE LUZ

Cuando estudiamos las ondas de sonido, introdujimos la noción de *rayo* para indicar la dirección de propagación de una onda. Los rayos son líneas rectas perpendiculares al frente de ondas. Esta concepción también es válida en el caso de ondas luminosas. Es decir, un rayo de luz es una recta trazada en la dirección de propagación de la luz. La idea visual de un rayo de luz la captamos cuando en una habitación poco iluminada observamos un haz de luz. En la fig 15.2 se muestra la idea representativa de rayos de luz. Recordemos que los frentes de onda corresponden a superficies sobre la línea de propagación, que representan máximos o mínimos de la amplitud de las ondas. Si

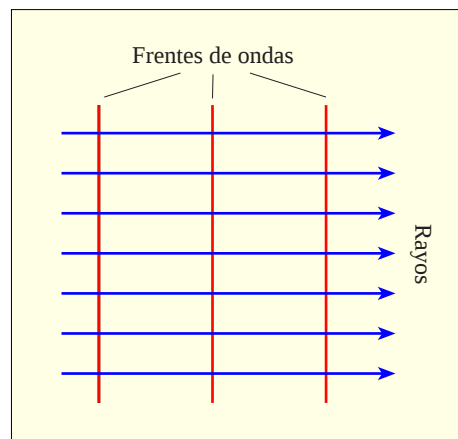


Fig. 15.2 Los rayos de luz son rectas perpendiculares a los frentes de onda.

los frentes de onda están muy lejanos de la fuente de ondas éstos aparecen como superficies planas y se habla, entonces, de *ondas planas*. La luz, como onda, exhibe los mismos fenómenos que el sonido: *reflexión*, *refracción* y *difracción*. Presenta, además, la característica de *dispersión*. A continuación, describimos cada uno de estos fenómenos.

15.5 REFLEXIÓN DE LA LUZ

Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie lisa, como la de un espejo se produce un rayo de luz reflejado, tal como se indica en la fig. 15.3 (a).

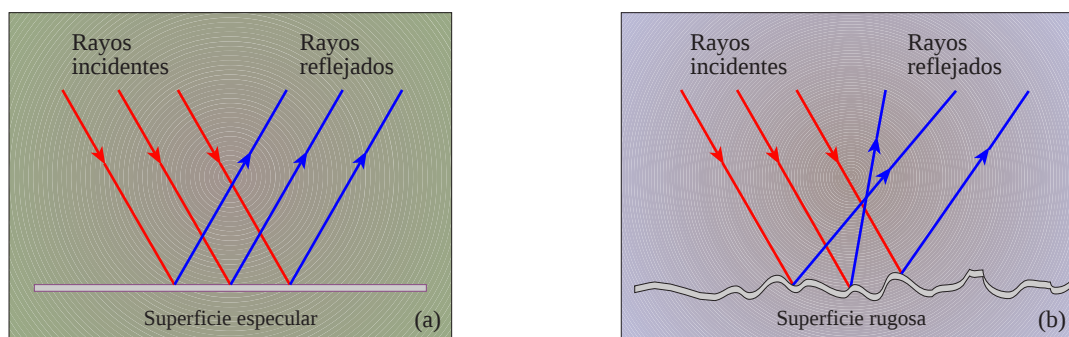


Fig. 15.3 a) En la reflexión especular los rayos reflejados son paralelos entre sí. b) En la reflexión difusa los rayos reflejados tienen direcciones aleatorias, que dependen del punto de incidencia de los rayos de luz sobre la superficie rugosa.

Cuando la superficie es especular (la de un espejo), los rayos reflejados son paralelos entre sí y se dice que la reflexión es especular. En la superficie rugosa los rayos reflejados tienen diferentes direcciones, dependiendo del punto sobre la cual choque el rayo incidente. En ese caso, se habla de *reflexión difusa*.

Es importante mencionar que los objetos que podemos ver pertenecen a dos categorías: aquellos que generan su propia luz, a los cuales se les llama *objetos luminosos* y los que sólo son capaces de reflejar la luz, los cuales reciben el nombre de *objetos iluminados*. El Sol y otras estrellas incandescentes son ejemplos de objetos luminosos, mientras que la Tierra y la Luna son ejemplos de objetos iluminados. En estos últimos, la luz es reflejada, lo que permite que el ojo pueda distinguirlos. La reflexión difusa es la que permite que un objeto sea observado desde varias direcciones diferentes. La Luna, por ejemplo, puede ser vista desde distintos sitios de la Tierra, porque la luz del Sol es reflejada en su superficie en muchas direcciones. También es necesario enfatizar que para poder ver un objeto que no sea una fuente de luz, debe haber reflexión: es la única forma como el ojo puede captar su presencia. La mayoría de los objetos que vemos es a causa de la reflexión difusa.

Cuando un haz de luz se refleja en una superficie especular, los rayos incidente y reflejado

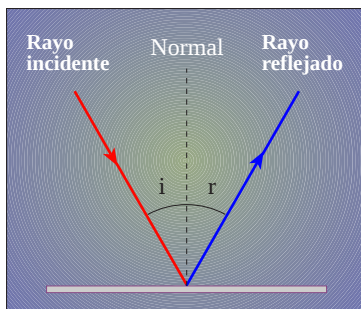


Fig. 15.4 En una superficie especular, el ángulo de incidencia, i , es igual al ángulo de reflexión, r .

forman ángulos i y r , con una recta normal a la superficie en el punto de choque con la misma, tal como se muestra en la fig. 15.4. A los ángulos i y r se les conoce como ángulos de *incidencia* y de *reflexión*, respectivamente, y, experimentalmente, se demuestra que *el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia*. Es decir:

$$i = r \quad (15.1)$$

La relación anterior es la expresión matemática de lo que se conoce como *ley de la reflexión*.

Ejemplo 15.1

Dos superficies especulares forman un ángulo de 90° entre sí, como se indica en la fig. 15.5. Si el ángulo de incidencia de un rayo de luz sobre el espejo horizontal es de 60° , ¿cuál es la dirección del rayo reflejado en el espejo vertical?

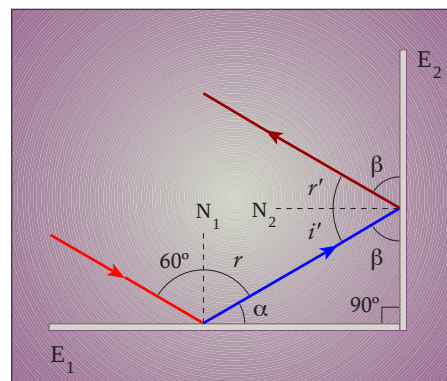


Fig. 15.5 Ejemplo 15.1.

Solución

De acuerdo con la ley de la reflexión, el ángulo r , que el rayo reflejado forma con la normal N_1 en el espejo E_1 es, también, igual a 60° ($r = 60^\circ$). Según la fig. 15.5:

$$r + \alpha = 90^\circ \quad \Rightarrow \quad \alpha = 90^\circ - r = 90^\circ - 60^\circ \quad \Rightarrow \quad \alpha = 30^\circ$$

Como $\alpha + \beta = 90^\circ$ (ángulos complementarios), se tiene:

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad \Rightarrow \quad \beta = 90^\circ - 30^\circ \quad \Rightarrow \quad \beta = 60^\circ$$

Entonces, el ángulo de incidencia, i' , sobre la superficie especular E_2 , puede obtenerse de la relación:

$$\beta + i' = 90^\circ \quad \Rightarrow \quad i' = 90^\circ - \beta \quad \Rightarrow \quad i' = 30^\circ$$

Usando nuevamente la ley de la reflexión:

$$r' = i' = 30^\circ$$

15.6 REFRACCIÓN DE LA LUZ

Un *medio transparente* es aquel que permite el paso de la luz a través del mismo. El aire y el agua son medios transparentes. Cuando un rayo de luz se propaga en el aire y choca contra la superficie de una masa de agua, en parte se refleja y vuelve al aire, mientras que otra parte penetra en el agua. El rayo que entra al agua se desvía con respecto a la normal y se habla, entonces, de *refracción*. En la fig. 15.6 se muestra la geometría envuelta en el caso. Al ángulo R , que forma el rayo refractado con la normal, se le conoce como *ángulo de refracción*. Cuando la luz pasa de un medio menos denso a uno más denso, disminuye su rapidez y el rayo refractado se acerca a la normal. Cuando el paso es desde un medio más denso a otro menos denso, aumenta su rapidez y el ángulo refractado se aleja de la normal.

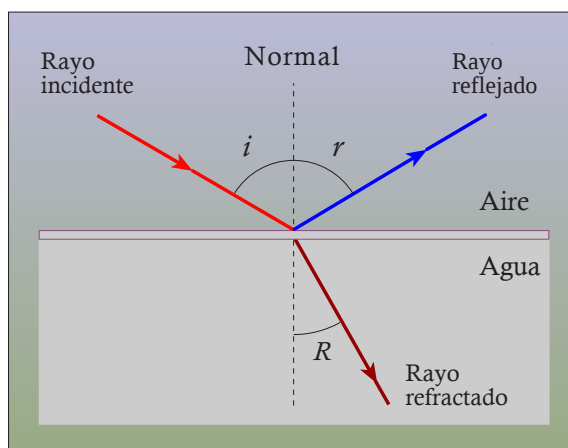


Fig. 15.6 Cuando un rayo de luz atraviesa el límite entre dos medios transparentes, el rayo refractado se desvía en comparación con el ángulo incidente.

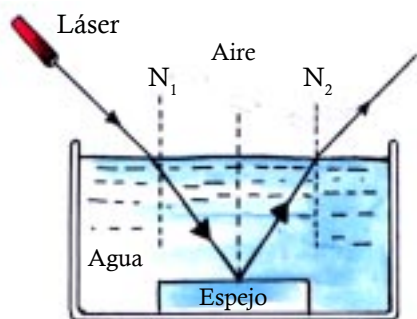


Fig. 15.7 El rayo láser sufre refracciones al cruzar el límite aire-agua y, luego, el límite agua-aire.

En la fig. 15.7 un rayo láser pasa del aire al agua, se refleja en un espejo que está en el fondo del tanque y pasa, nuevamente, al aire. Cuando se producen cambios de medio, el rayo refractado se acerca a la normal N_1 , mientras que al salir del agua el rayo refractado se aleja de la normal N_2 , por ser el aire menos denso que el agua.

La luz alcanza su mayor rapidez en el vacío, con un valor de $3 \cdot 10^8$ m/s, valor que es muy aproximado a la rapidez en el aire. En otros medios, la rapidez de la luz es menor que en el vacío. Con el fin de proporcionar una idea de la rapidez de la luz en medios distintos al vacío, se define el llamado

índice de refracción, dado por:

$$n = \frac{\text{Rapidez de la luz en el vacío}}{\text{Rapidez de la luz en un medio}} = \frac{c}{v} \quad (15.2)$$

Donde v es la rapidez de la luz en un medio cualquiera. En la tabla 15.1 se indican los índices de refracción de algunas sustancias para una longitud de onda de 590 nm. El valor de n es siempre mayor que 1 ya que $c > v$. Como puede deducirse de la relación (15.2), n es una cantidad adimensional. Para determinar, por ejemplo, la rapidez de la luz en el agua, notamos que para esta sustancia $n = 1,333$ y, por lo tanto:

$$v_{\text{Agua}} = \frac{c}{n_{\text{Agua}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,333} = 2,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Sólidos	Índice de Refracción (n)	Gases y Líquidos	Índice de Refracción (n)
Hielo (H ₂ O)	1,309	Aire	1,00029
Cloruro de Sodio (NaCl)	1,544	Dióxido de Carbono (CO ₂)	1,00045
Vidrio Flint	1,66	Agua	1,333
Poliestireno	1,49	Alcohol Etílico	1,361
Diamante	2,42	Benceno	1,501

Tabla 15.1 Índices de refracción de algunas sustancias ($\lambda = 590 \text{ nm}$).

La relación entre la rapidez de la luz en distintos medios fue determinada, experimentalmente, por el astrónomo y matemático alemán Willebrord Snell, quien estableció la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } R} = \frac{v_2}{v_1} = \text{constante} \quad (15.3)$$

Donde:

i = ángulo de incidencia
 v_1 = rapidez en el medio 1

R = ángulo de refracción
 v_2 = rapidez en el medio 2

Las expresiones $\text{sen } i$ y $\text{sen } R$ corresponden a la función “seno” que se estudia en trigonometría. A la relación (15.3) se le conoce como Ley de Snell.

Es pertinente destacar que cuando la luz pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, lo que varía son su velocidad y su longitud de onda. En la fig. 15.8 se muestran dos medios de distintos índices de refracción. La relación $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$ es válida para ambos medios y podemos escribir:

$$v_1 = \lambda_1 f \quad v_2 = \lambda_2 f$$

Dividiendo las ecuaciones anteriores:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1 f}{\lambda_2 f} \Rightarrow \boxed{\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (15.4)$$

De acuerdo con (15.2):

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \Rightarrow v_1 = \frac{c}{n_1} \quad n_2 = \frac{c}{v_2} \Rightarrow v_2 = \frac{c}{n_2}$$

Sustituyendo los valores de v_1 y v_2 en (15.4):

$$\frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \Rightarrow \boxed{\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}} \quad (15.5)$$

La relación (15.5) establece que las longitudes de ondas son inversamente proporcionales a los índices de refracción. Es decir si un medio M_1 es más denso que otro M_2 ($n_2 > n_1$), la longitud de onda en M_1 es menor que la longitud de onda en M_2 ($\lambda_2 < \lambda_1$).

Igualando las relaciones (15.4) y (15.5) nos queda:

$$\boxed{\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}} \quad (15.6)$$

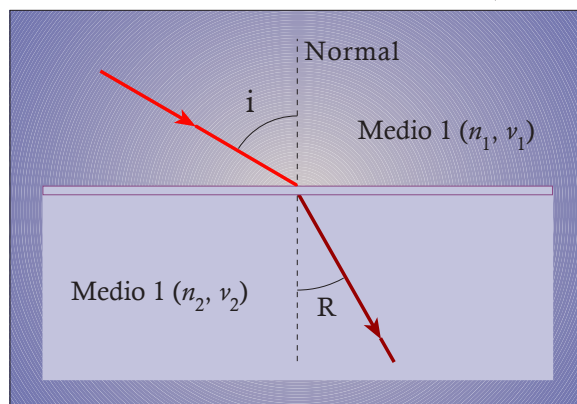


Fig. 15.8 Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro, su velocidad y longitud de onda cambian.

Ejemplo 15.2

El diamante es un sólido muy denso, cuyo índice de refracción, para un haz de luz de 590 nm, es 2,42. Un rayo de luz, que se propaga en el aire, se hace incidir sobre un trozo de diamante. ¿Cuáles son la rapidez de la luz y su longitud de onda en el interior del diamante?

Solución

Para el aire, $v_1 = c = 3 \cdot 10^8$ m/s, $n_1 = 1$. Usando (15.6):

$$v_2 = \frac{n_1}{n_2} v_1 = \frac{1}{2,42} \cdot 3 \cdot 10^8 = 1,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

La longitud de onda en el aire es de 590 nm. De acuerdo con (15.5) y llamando λ_2 a la longitud de onda en el diamante:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \lambda_2 = \frac{n_1}{n_2} \lambda_1 = \frac{1}{2,42} \cdot 590 = 243,80 \text{ nm}$$

Como se puede concluir de los resultados anteriores tanto la rapidez como la longitud de onda son menores en el diamante que en el aire. Esto era de esperar, ya que el diamante es un medio más denso que el aire.

15.7 FENÓMENOS VISUALES ASOCIADOS CON LA REFRACCIÓN DE LA LUZ

En la experiencia común de la gente hay ciertos fenómenos visuales asociados con la refracción de la luz. Uno de ellos tiene que ver con la profundidad aparente, que percibimos de un objeto sumergido en agua. En la fig. 15.9 se muestra por qué ocurre este efecto. La luz, reflejada por el pez, sufre una desviación en el límite entre el agua y el aire (se refracta), alejándose de la normal. Como estamos habituados a ver en línea recta, la luz que recibimos del rayo refractado hace que sigamos su trayectoria, por lo que la imagen del pez es observada a una distancia h' de la superficie, que es menor que la distancia h , a la cual se encuentra realmente el pez.

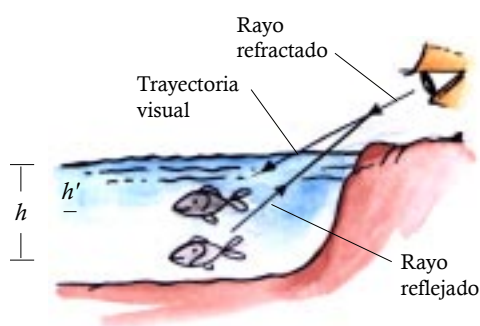


Fig. 15.9 La refracción de la luz en la interfase agua – aire y el acondicionamiento del cerebro humano a percibir la luz en línea recta, hace que el pez sea observado a una menor profundidad.

El fenómeno de refracción se pone, también, en evidencia cuando sumergimos un pitillo en un líquido, como se ilustra en la fig. 15.10. La porción sumergida del pitillo parece acercarse hacia la superficie, dando la impresión de que está partido en la interfase líquido – aire.



Fig. 15.10 La refracción hace que el pitillo sumergido en un líquido, aparezca visualmente como si estuviera partido.

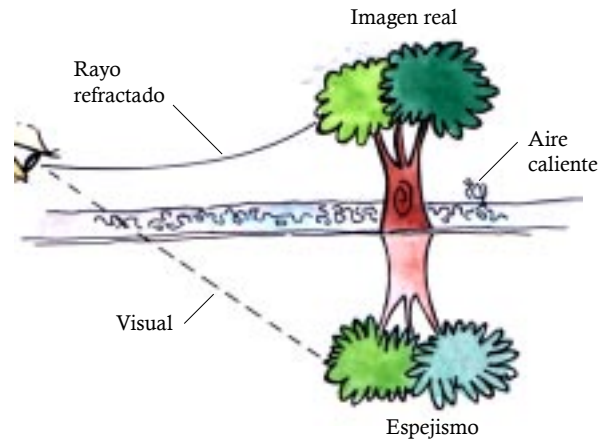


Fig. 15.11 La diferencia de temperatura en las capas cercanas al pavimento, crea la ilusión óptica (espejismo).

Otro fenómeno óptico interesante es el de los espejismos, que resulta de la refracción atmosférica debida a la diferencia de densidad entre las capas de aire. En la fig. 15.11 se muestra un caso típico de este fenómeno. El árbol refleja la luz solar y el rayo se refracta por la diferencia de temperaturas entre las capas de aire cercanas a la superficie. Como consecuencia, un observador, siguiendo la visual en línea recta, detecta una imagen distinta a la del árbol (espejismo).

Son comunes, también, los espejismos de carretera, donde la vía aparenta estar húmeda, como consecuencia de la refracción de la imagen del cielo a través de capas calientes de aire.

Finalmente, es importante destacar la descomposición de la luz visible, cuando atraviesa los medios apropiados. Como ya hemos visto, la radiación visible del espectro electromagnético está constituida por colores, que van desde el rojo hasta el violeta. Entre esos dos colores están el anaranjado, el amarillo, el verde, el azul y el índigo. Cada uno de estos colores posee una longitud de onda característica. Cuando un rayo de luz solar (luz blanca)

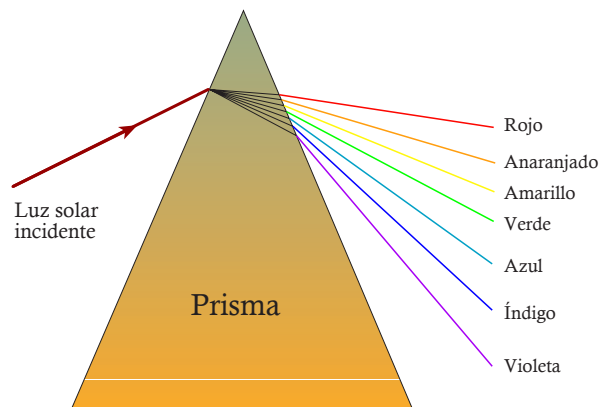


Fig. 15.12 Un prisma descompone la luz solar en sus diversos componentes.

se hace pasar a través de un prisma, se descompone en sus diversos componentes, como lo muestra la fig. 15.12. A este efecto se le conoce como dispersión, que tiene lugar porque el índice de refracción es diferente para cada longitud de onda, lo que hace que cada componente del espectro de luz visible se refracte con un ángulo determinado, con respecto a la normal. La dispersión es la causante del arco iris, observable después de una lluvia, cuando una gran cantidad de gotas de agua, que descomponen la luz solar, actúan como prismas.



PIENSA Y EXPLICA



- 15.1 ¿Cómo está relacionada la luz con la presencia de seres vivos en la Tierra?
- 15.2 ¿Qué idea tenían los filósofos griegos sobre la naturaleza de la luz?
- 15.3 ¿Qué concepto manejaba Newton sobre la naturaleza de la luz?
- 15.4 ¿Cómo explicaba la teoría corpuscular de Newton la reflexión y la refracción de la luz?
- 15.5 ¿Cómo aparece la teoría ondulatoria de la luz? ¿Qué es la difracción de la luz?
- 15.6 ¿Por qué se inventó el éter?
- 15.7 ¿Qué aporte hizo Maxwell a la teoría ondulatoria de la luz?
- 15.8 Explica la contribución de Einstein en la comprensión de la naturaleza de la luz.
- 15.9 ¿Qué se conoce como espectro electromagnético? Explica cómo se distribuyen las distintas frecuencias en el mismo.
- 15.10 ¿Qué frecuencias y qué colores más comunes aparecen en el espectro de la luz visible? ¿Cuáles son sus longitudes de onda?

- 15.11** Describe los diferentes tipos de ondas en el espectro electromagnético y el uso que se da a las mismas.
- 15.12** ¿Es constante la rapidez de la luz?
- 15.13** ¿Cuál es la velocidad de la luz?
- 15.14** ¿Qué es un rayo de luz?
- 15.15** ¿Qué son ondas planas?
- 15.16** Describe la reflexión especular y la reflexión difusa de la luz.
- 15.17** ¿Qué son objetos luminosos y objetos iluminados?
- 15.18** En la visualización de un objeto, ¿cuál es más importante, la reflexión especular o la difusa? Explica.
- 15.19** Mediante la figura adecuada, explica la ley de reflexión.
- 15.20** ¿Qué es un medio transparente?
- 15.21** Describe el fenómeno de refracción de la luz.
- 15.22** ¿Qué es el índice de refracción? ¿Cómo se expresa?
- 15.23** Escribe la ley de Snell.
- 15.24** Deduce las relaciones (15.4) y (15.5) entre las longitudes de onda, los índices de refracción y las velocidades de ondas en distintos medios.
- 15.25** Explica el acercamiento visual de objetos sumergidos en agua.
- 15.26** Explica por qué un objeto alargado “se dobla”, cuando se introduce en el agua.
- 15.27** ¿Cómo se producen los espejismos?
- 15.28** ¿Cómo se producen los arcos iris?



PROBLEMAS

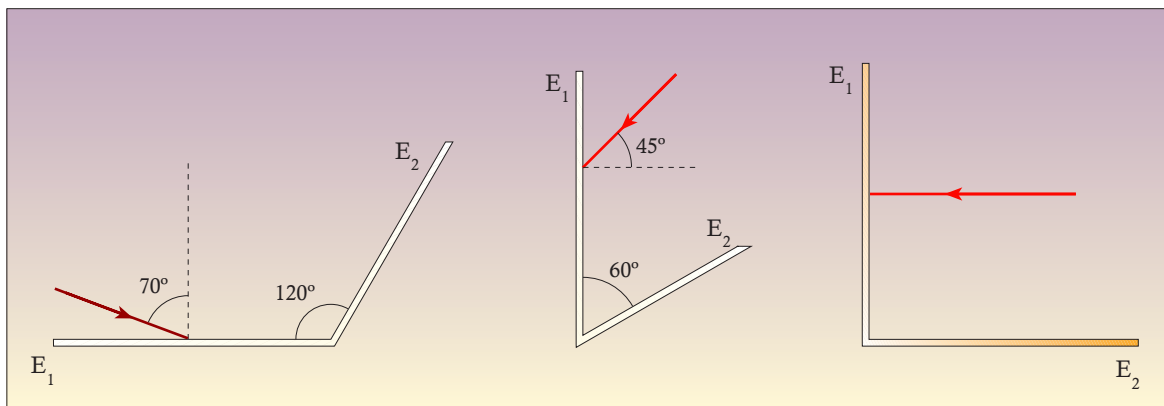


Fig. 15.13 Problema 15.1.

- 15.1** Determina la dirección del rayo después de reflejarse en el espejo E_2 , de la fig. 15.13.
- 15.2** ¿Qué distancia recorrerá la luz en un año? A esta distancia se le denomina años – luz.
- 15.3** La longitud de onda de un haz de luz en el aire es de 589 nm. a) ¿Cuál es su frecuencia? b) ¿Cuáles son su frecuencia y longitud de onda en el agua?
- 15.4** La rapidez de la luz en un material es de $2,05 \cdot 10^{-8}$ m/s. ¿Cuál es el índice de refracción del material?
- 15.5** ¿Cuál es la rapidez de la luz en el benceno? ¿En el hielo?
- 15.6** Si la luz atraviesa una placa cristalina de $18 \cdot 10^{-10}$ s, ¿cuál es el espesor de la placa?

CAPÍTULO 16



Espejos y Lentes

Estamos tan acostumbrados a convivir con los muchos artefactos creados por el ingenio humano, que los mismos pasan desapercibidos y su utilidad se diluye en el diario transcurrir. Este es el caso de los espejos y los lentes, sin cuyo auxilio no hubiéramos podido explorar el mundo de lo pequeño y de lo grande: desde las microscópicas estructuras de lo animado o inanimado hasta las inmensas profundidades del cosmos.

16.1 ESPEJOS PLANOS

Un espejo plano es una superficie lisa y plana, la cual refleja la mayor parte de la luz que sobre él incide. Si un objeto se coloca delante de un espejo plano la luz, que emite o que refleja, se difunde en muchas direcciones. Si estos rayos de luz alcanzan al espejo, tal como se ilustra en la fig. 16.1, un observador parado delante del mismo captará la imagen del objeto, debido a la reflexión de los rayos en el espejo. El observador tiene la impresión que el objeto está situado en el punto I , donde se cortan las prolongaciones de los rayos reflejados. A esta imagen, que parece originarse en I , se le conoce como *imagen virtual*.

Entonces, para determinar la distancia de la imagen virtual al espejo, basta con prolongar

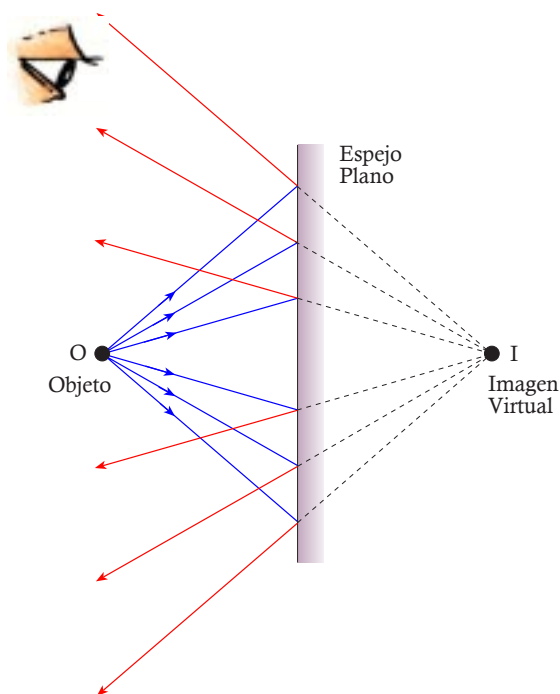


Fig. 16.1 Formación de la imagen I de un objeto O en un espejo plano.

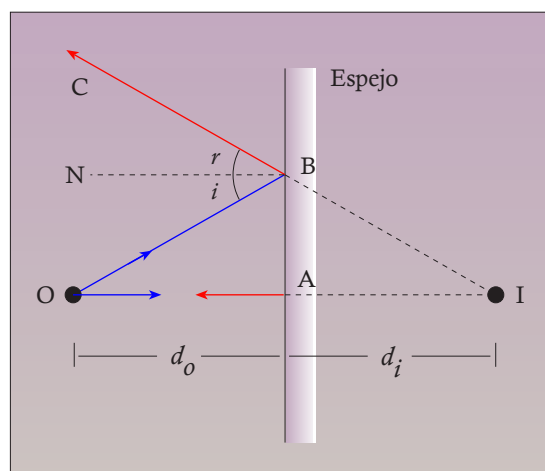
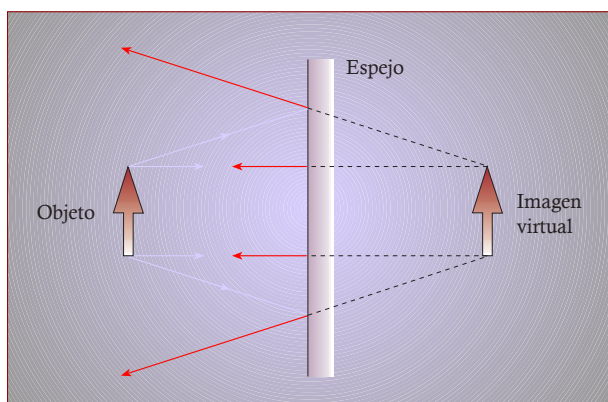


Fig. 16.2 Formación de imagen, I, de un objeto puntual, O, en un espejo plano. Las distancias d_o y d_i son iguales.

dos rayos reflejados y encontrar su punto de intersección. En la fig. 16.2 se muestra cuál es el procedimiento para determinar la imagen virtual de un punto: se trazan los rayos incidentes OA y OB, el primero perpendicular al espejo y el segundo formando un ángulo i con la normal N. Los rayos reflejados correspondientes son AO y BC, respectivamente. Al prolongar los rayos reflejados en la fig. 16.2 (líneas punteadas), obtenemos la imagen virtual I del objeto O. Los triángulos OAB e IAB son triángulos semejantes y por lo tanto, las distancias d_o y d_i son iguales ($d_o = d_i$). Lo anterior indica que la imagen virtual de un objeto en un espejo plano es simétrica con respecto al mismo.



Si se trata de un objeto no puntual, la imagen virtual se determina seleccionando dos o más de sus puntos y haciendo el mismo procedimiento anterior, tal como se muestra en la fig. 16.3.

Fig. 16.3 Imagen virtual de un objeto no puntual en un espejo plano.

El concepto de imagen virtual puede parecer controversial, ya que, realmente, esa imagen parece situarse detrás del espejo; pero, si intentáramos agarrarla, resultaría imposible. Sin embargo, si realizáramos el siguiente experimento se vería la fortaleza del modelo (fig. 16.4): a una distancia d , enfrente de un espejo, se coloca una vela encendida y a esa misma distancia y, detrás del espejo, se coloca una vela similar, pero apagada. La recta que une a ambas velas es perpendicular al espejo. Un observador, en la posición mostrada en la fig. 16.4, captará la imagen de una vela encendida al mirar al espejo.

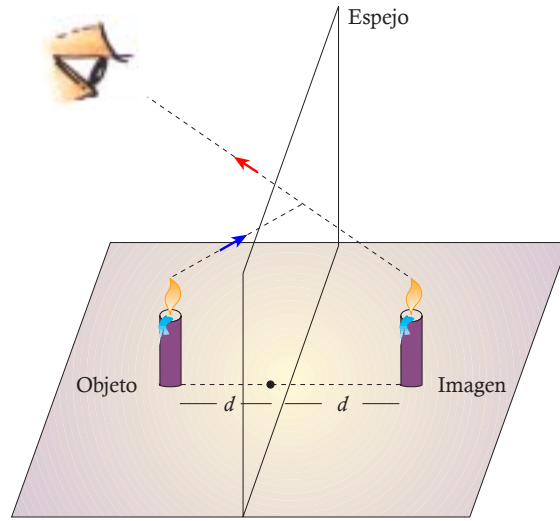


Fig. 16.4 Si se coloca una vela apagada a la misma distancia perpendicular que tiene una vela encendida, se observará que la imagen virtual aparece, también, como una vela encendida.

Las siguientes características son propias de la imagen virtual de un objeto en un espejo plano:

- a. La imagen virtual parece formarse detrás del espejo, a una distancia del mismo igual a la distancia del objeto con respecto al espejo.
- b. La imagen virtual tiene las mismas dimensiones que el objeto. Se dice, entonces, que *el factor de magnificación*, M , es igual a 1. Si llamamos h_o a la altura del objeto y h_i a la de la imagen, M se define como:

$$M = \frac{\text{Altura de la imagen}}{\text{Altura del objeto}} = \frac{h_i}{h_o} \quad (16.1)$$

- c. La imagen virtual está orientada en la misma dirección vertical que el objeto. Así, en la fig. 16.3, la punta de la flecha apunta hacia arriba, tanto en el objeto como en la imagen virtual.
- d. La imagen virtual presenta una inversión derecha – izquierda, con respecto al objeto. Por ejemplo, ver fig. 16.5, una palabra resulta invertida de derecha a izquierda al colocarse frente a un espejo plano.

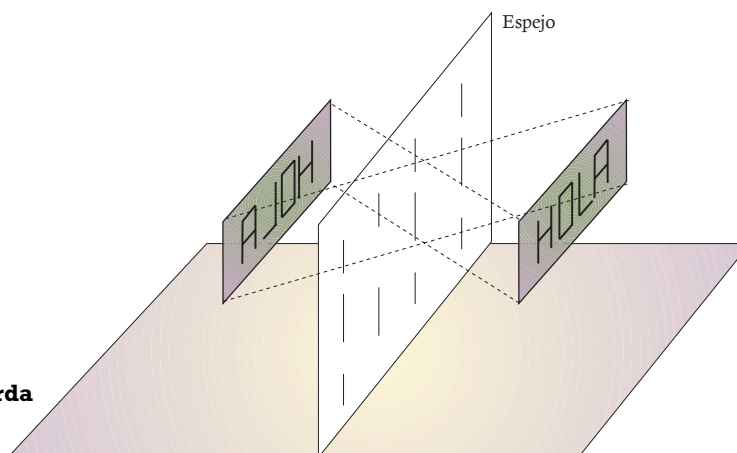


Fig. 16.5 Inversión derecha – izquierda en un espejo plano.

Ejemplo 16.1

¿Dónde debe ubicarse un observador para ver la imagen del punto colocado cerca del espejo plano de la fig. 16.6(a)?

Solución

En la fig. 16.6 (b) se dibujan rayos incidentes desde el punto A hasta los extremos del espejo. La prolongación de los rayos reflejados forma la imagen A', que sólo podrá ser vista por un observador colocado entre dichos rayos.

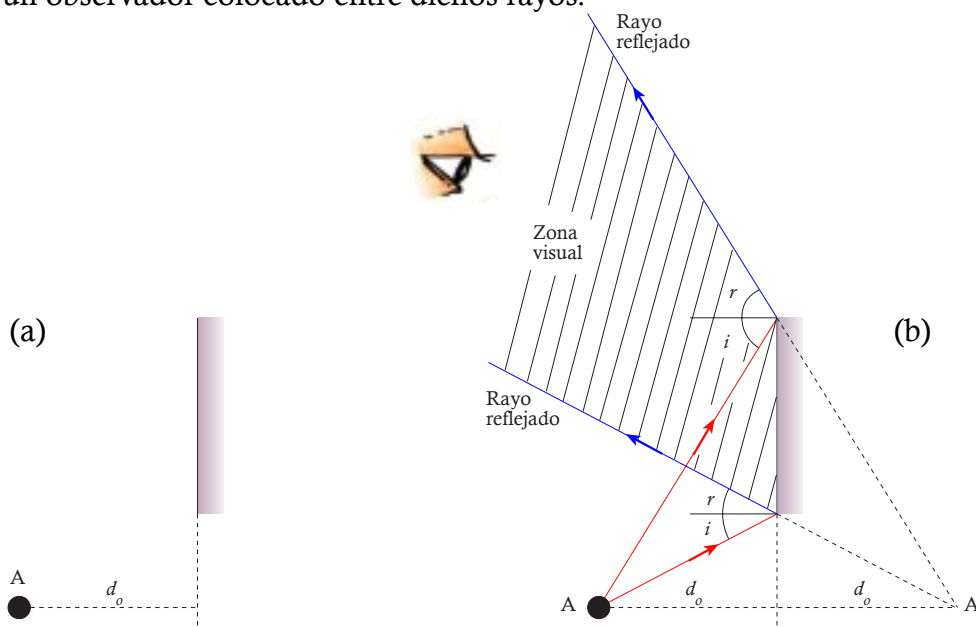


Fig. 16.6 Ejemplo 16.1.



PIENSA Y EXPLICA



- 16.1** ¿Qué es un espejo plano?
- 16.2** ¿Qué es una imagen virtual y cómo se forma en un espejo plano? Dibuja el diagrama correspondiente a la imagen de un punto.
- 16.3** Establece, mediante el diagrama adecuado, cómo se forma la imagen de un objeto en un espejo plano.
- 16.4** Menciona las características de una imagen virtual en un espejo plano.
- 16.5** ¿Qué es el factor de magnificación de un espejo plano?
- 16.6** Un objeto colocado entre dos espejos paralelos forma múltiples imágenes. ¿Cómo tiene esto lugar?
- 16.7** Un objeto colocado entre dos espejos perpendiculares entre sí, forma 3 imágenes. ¿Cómo se produce esto?



PROBLEMAS



- 16.1** Un objeto de altura 12 cm se coloca a una distancia de 30 cm de un espejo plano. **a)** ¿Cuál es la distancia del espejo a la imagen? **b)** ¿Cuáles son la altura de la imagen y la amplificación del espejo?
- 16.2** Un niño está colocado a una distancia de 5 m de un espejo plano. **a)** ¿Cuál es la distancia a su imagen? **b)** Al ver su figura, el niño corre hacia el espejo con una rapidez de 0,4 m/s, ¿con qué rapidez se acerca a su imagen?

16.3 Dibuja las imágenes de los objetos mostrados en la figura 16.7 sobre un espejo plano.

16.4 El ángulo de incidencia del rayo R sobre el espejo plano de la figura 16.8 es de 60° . Si se hace girar el espejo un ángulo de 20° , en la forma mostrada, ¿cuánto mide el ángulo del nuevo rayo reflejado?

16.5 ¿Dónde debe colocarse un observador delante de un espejo plano, para ver la imagen del punto A de la figura 16.9?

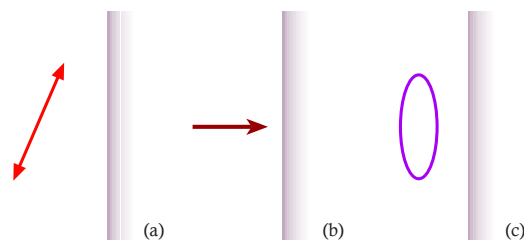


Fig. 16.7 Problema 16.3.

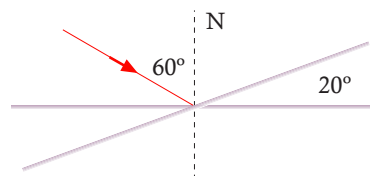


Fig. 16.8 Problema 16.4.



Fig. 16.9 Problema 16.5.

16.2 ESPEJOS ESFÉRICOS

Un espejo esférico es una superficie esférica capaz de reflejar la luz. Si las reflexiones se producen desde el interior de la superficie esférica, se trata de un *espejo cóncavo*, mientras si lo hace desde el exterior de la superficie esférica, nos referimos a él como un *espejo convexo*. En la fig. 16.10 se muestran ambos tipos de espejos. Las superficies esféricas de espejos corresponden a una porción de la superficie

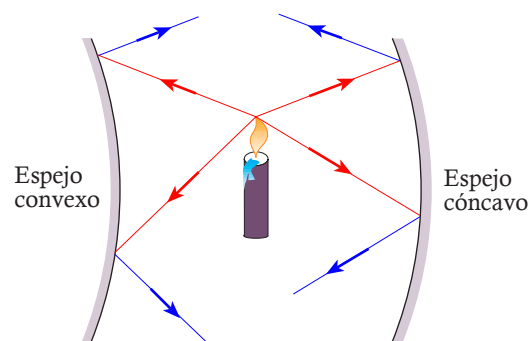


Fig. 16.10 Espejos convexo y cóncavo.

de una esfera de centro **C** y radio **R**.

En la fig. 16.11 se indican algunos elementos pertinentes a la geometría de los espejos esféricos. **C** es el centro de la esfera, cuya superficie contiene al espejo. **V** es el vértice del espejo. La recta que pasa por el centro y por el vértice recibe el nombre de *eje óptico*. Al centro **C** de la esfera se le denomina *centro de curvatura* y a la distancia radial entre el centro de curvatura y el vértice se le llama *radio de curvatura R*.

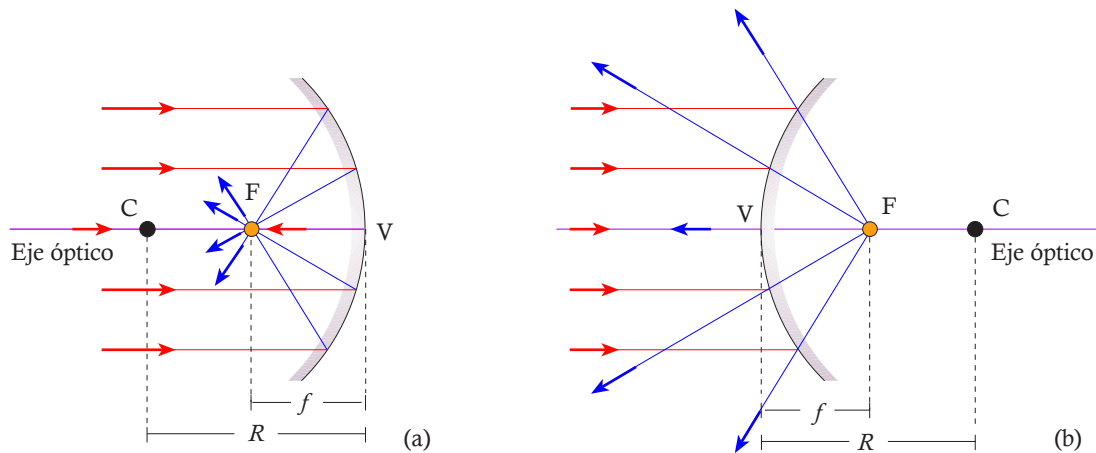


Fig. 16.11 Elementos importantes en espejos esféricos y reflexión de rayos paralelos al eje óptico.

Cuando el ancho del espejo es pequeño en relación con el radio de curvatura, y se hacen incidir rayos paralelos al eje óptico sobre la superficie especular, los rayos reflejados en un espejo cóncavo se cortan en un punto al cual se le conoce como *punto focal* o *foco* F . Si se trata de un espejo convexo, la prolongación de los rayos reflejados se cortan en el foco. En el primer caso, espejo cóncavo, se dice que los rayos convergen en el foco y al espejo se le llama *espejo convergente*; mientras que para el espejo convexo, los rayos parecen diverger del punto focal, colocado detrás del mismo, y se habla de *espejo divergente*.

La *longitud focal*, f , es la distancia entre el foco y el vértice de un espejo y, si el objeto está muy alejado del espejo, es igual a la mitad de la distancia correspondiente al radio de curvatura, R :

$$f = \frac{R}{2}$$

(16.2)

16.3 FORMACIÓN DE IMÁGENES EN ESPEJOS ESFÉRICOS

Las imágenes en los espejos esféricos pueden determinarse haciendo uso de algunos rayos relevantes o notables, con origen en los objetos situados en frente de dichos espejos. Estos rayos son:

- Rayo central o radial:** incide normalmente sobre la superficie especular, pasando a través del centro de curvatura, C . Por incidir perpendicularmente sobre el espejo, se refleja sobre sí mismo.
- Rayo paralelo:** es un rayo paralelo al eje óptico y se refleja a través del punto focal.

- c. **Rayo focal:** Es un rayo que pasa (o cuya prolongación pasa) por el foco y se refleja paralelo al eje óptico.

En la fig. 16.12 se indican los diagramas de reflexión para los rayos notables, descritos anteriormente. Mediante el uso de los mismos, es posible construir, geométricamente, la imagen de un objeto colocado frente a un espejo esférico. Para ello, es usual utilizar el extremo del objeto y, a partir de allí, trazar al menos 2 de los 3 rayos relevantes que hemos mencionado. En la fig. 16.13 se ilustra el procedimiento.

En el caso del espejo cóncavo de la fig. 16.13, el objeto está a una mayor distancia que el radio de curvatura. El punto de intersección de los rayos central, paralelo y focal, nos da la imagen de la punta de la flecha. La imagen, en este caso, tiene las siguientes características:

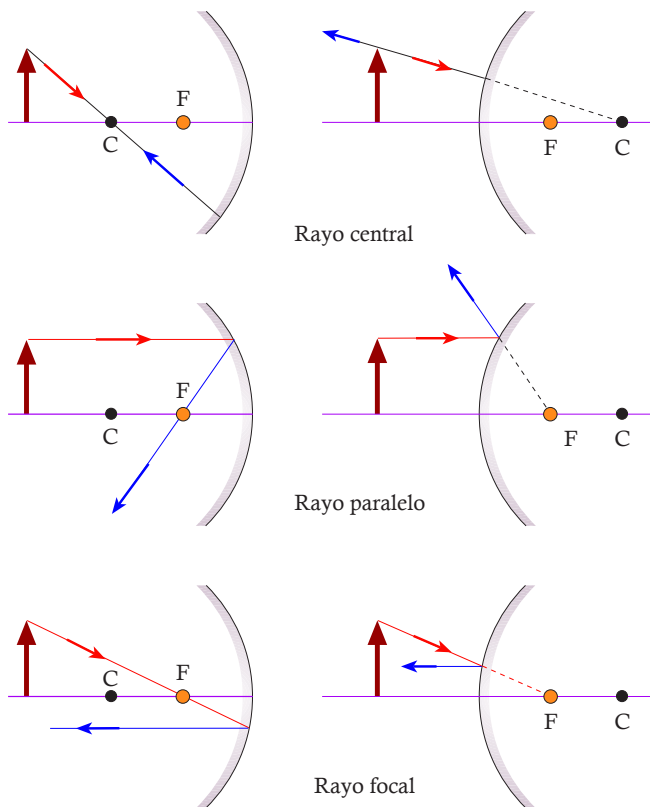


Fig. 16.12 Rayos notables en espejos cóncavos y convexos.

1. Es una imagen real: esto significa que si colocamos una pantalla a una distancia d_i del vértice del espejo, se observará la imagen de la flecha.
2. La imagen es invertida.
3. La imagen es más pequeña que el objeto.

Para el espejo convexo, podemos establecer lo siguiente:

1. La imagen es virtual, tal como aparecería en un espejo plano.
2. La imagen no es invertida.
3. La imagen es más pequeña que el objeto.

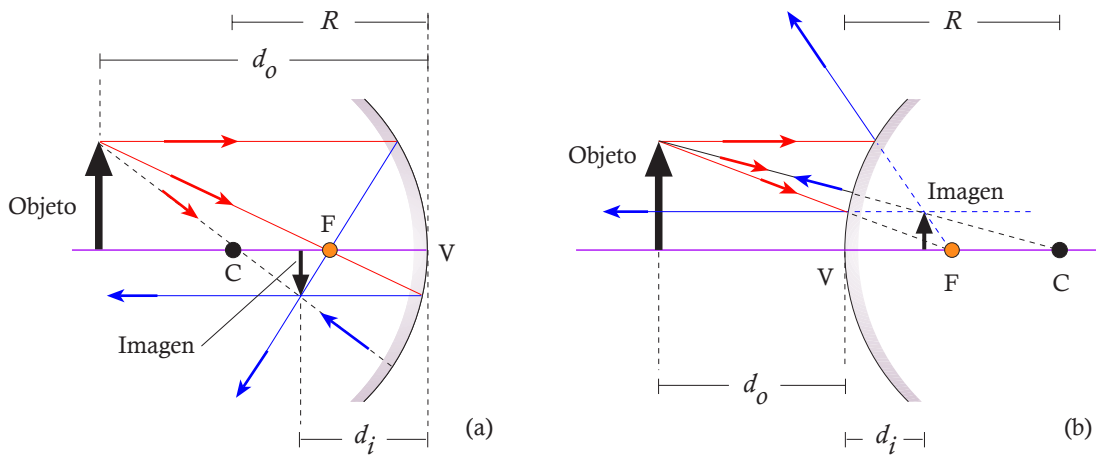


Fig. 16.13 Método geométrico para la construcción de una imagen en espejos cóncavos y convexos.

Es importante observar que la imagen en el espejo convexo se construye prolongando los rayos reflejados detrás del espejo. De la fig. 16.13, también puede deducirse que bastarían sólo 2 rayos notables, por ejemplo, los rayos paralelo y central, para determinar la imagen de un objeto en un espejo esférico.

Aparte de la fig. 16.13(a), donde el objeto está colocado a una distancia d_o , mayor que el radio R ($d_o > R$), podemos considerar 4 situaciones adicionales, que dan lugar a imágenes de distintas características, tal como se hace notar en la fig. 16.14(a), (b), (c) y (d).

1. El objeto está situado en el centro de curvatura, C, ($d_o = R$): la imagen es real, invertida y del mismo tamaño del objeto. Está ubicada a una distancia R del vértice. Fig. 16.14(a).

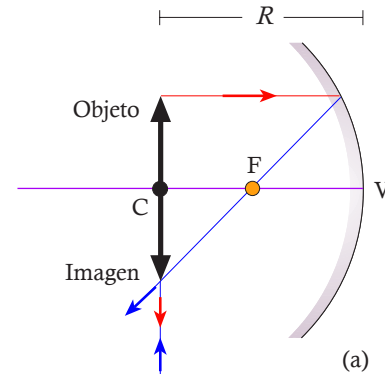


Fig. 16.14 (a).

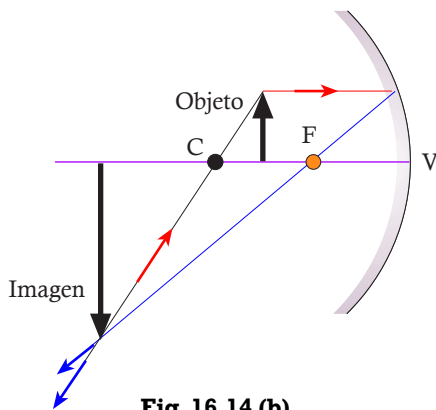


Fig. 16.14 (b).

2. La imagen está situada entre el centro de curvatura y el foco ($f < d_o < R$): la imagen es real, invertida y ampliada. Fig. 16.14 (b).

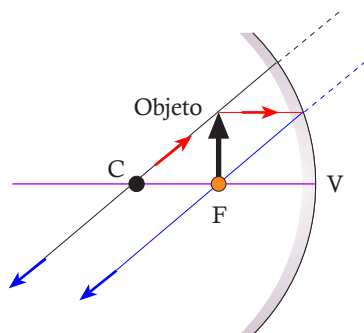
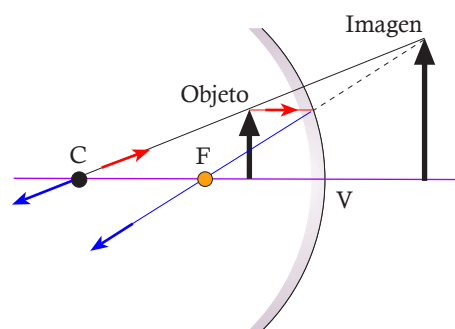


Fig. 16.14 (c).

4. **El objeto se ubica entre el foco y el vértice del espejo ($d_o < f$):** la imagen es virtual, no invertida y de mayor tamaño que el objeto. Fig. 16.14 (d).



(d)

Fig. 16.14 (d).



PIENSA Y EXPLICA

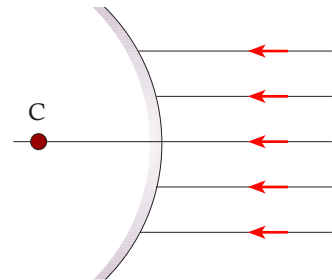
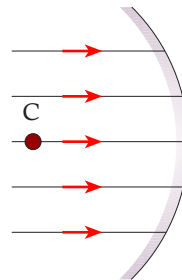


- 16.8** ¿Qué es un espejo esférico? ¿Uno cóncavo? ¿Uno convexo?
- 16.9** Define los siguientes términos, correspondientes a la geometría de los espejos esféricos: eje óptico, centro de curvatura, radio de curvatura, punto focal, longitud focal.
- 16.10** ¿Por qué se dice que los espejos cóncavos y convexos son espejos convergentes y divergentes, respectivamente?
- 16.11** ¿Qué relación hay entre la distancia focal y el radio de curvatura?
- 16.12** Describe los rayos central, paralelo y focal y explica cómo se reflejan en un espejo esférico. Dibuja los diagramas correspondientes.

- 16.13** Explica la formación de imágenes en un espejo cóncavo, para distintas distancias del objeto al espejo.
- 16.14** Explica la formación de imágenes en un espejo convexo, para distintas distancias del objeto al espejo.
- 16.15** En los espejos retrovisores laterales de los vehículos de reciente fabricación, se hace la siguiente advertencia: "la imagen en el espejo muestra objetos más lejanos de lo que en realidad, están". Explica la razón de la advertencia.
- 16.16** ¿Por qué los vehículos de rescate de víctimas tienen la palabra "AMBULANCIA", escrita al revés en la parte delantera?

**PROBLEMAS**

- 16.6** Para el espejo convexo, mostrado en la fig. 16.15, determina y dibuja:
a) El eje óptico. b) El vértice. c) El centro de curvatura. d) El foco. El radio de curvatura es $R = 5$ cm.
- 16.7** Para los espejos cóncavos y convexos, de la fig. 16.16, a) Localiza el foco. b) Dibuja los rayos reflejados.

**Fig. 16.15** Problema 16.6.**Fig. 16.16** Problema 16.7.

16.8 Determina la imagen para cada uno de los casos mostrados en la fig. 16.17: **a)** $d_o > R$ **b)** $f < d_o < R$. **c)** $d_o = f$. En cada caso, caracteriza a la imagen (real o virtual, mayor o menor, derecha o invertida).

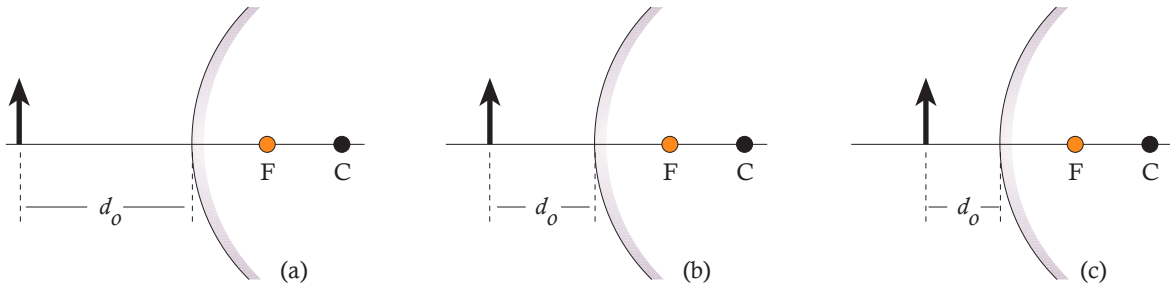


Fig. 16.17 Problema 16.8.

16.4 AUMENTO EN LOS ESPEJOS ESFÉRICOS

De acuerdo con lo estudiado anteriormente, la imagen de un objeto puede tener dimensiones mayores, iguales o menores que el mismo, dependiendo del tipo de espejo y de la posición del objeto con respecto al espejo. A la relación entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto se le denomina *aumento* o *amplificación* del espejo.

Con el fin de determinar el aumento de un espejo cóncavo, para un objeto colocado a una distancia mayor que el radio de curvatura ($d_o > R$), hacemos uso de la fig. 16.18. Para obtener la imagen de la flecha, se traza un rayo que pasa por el centro de curvatura y otro que se refleja en el vértice del espejo. El primero se refleja sobre sí mismo, mientras que en el segundo, el ángulo de reflexión, r , es igual al ángulo de incidencia, i . La longitud del objeto, la designamos mediante la distancia MN y la longitud de la imagen, la designamos por la distancia $M'N'$.

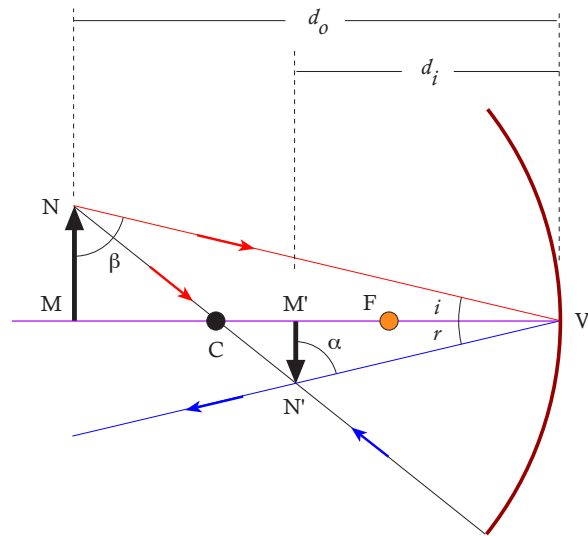


Fig. 16.18 Esquema geométrico para determinar el aumento de un espejo cóncavo.

En la fig. 16.18 se observa que los triángu-

los MNV y $M'N'V$ son semejantes, por poseer sus ángulos iguales ($i = r$, $\alpha = \beta$). De acuerdo a esto, podemos escribir:

$$M = \frac{M'N'}{MN} = \frac{d_i}{d_o} \quad (16.3)$$

La relación anterior indica que el aumento de un espejo ($M'N'/MN$) puede obtenerse dividiendo la distancia, d_i , del espejo a la imagen, entre la distancia d_o del espejo al objeto. Para obtener el tamaño de la imagen, despejamos $M'N'$ de (16.3):

$$M'N' = \frac{d_i}{d_o} \cdot MN$$

Como convención, y para tomar en cuenta cuándo una imagen es invertida (signo $-$) y cuándo es derecha (signo $+$), a la relación (16.3) se le antepone un signo negativo:

$$M = -\frac{d_i}{d_o} \quad (16.4)$$

16.5 ECUACIÓN DE LOS ESPEJOS ESFÉRICOS

Volvamos a la fig. 16.18, la cual se muestra nuevamente como fig. 16.19, para determinar la relación existente entre d_o , d_i y la distancia focal, f .

Los triángulos MNC y $M'N'C$ son semejantes por tener iguales sus ángulos internos. Luego, puede escribirse:

$$\frac{M'N'}{MN} = \frac{M'C}{MC} \quad (16.5)$$

También:

$$M'C = CV - M'V$$

Pero $CV = R$ y $M'V = d_i$. Sustituyendo en la relación anterior:

$$M'C = R - d_i$$

De acuerdo con la relación (16.2), $R = 2f$, por lo que $M'C$ nos queda:

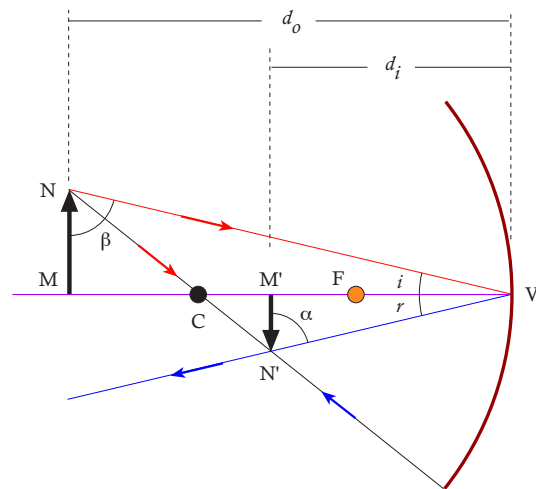


Fig. 16.19 Determinación de la ecuación de los espejos esféricos.

$$M'C = 2f - d_i \quad (16.6)$$

Similarmente,

$$MC = MV - CV = d_o - R \Rightarrow MC = d_o - 2f \quad (16.7)$$

Como, de acuerdo a (16.3) $\frac{M'N'}{MN} = \frac{d_i}{d_o}$, podemos combinar (16.6) y (16.7) con (16.5):

$$\frac{d_i}{d_o} = \frac{2f - d_i}{d_o - 2f}$$

Efectuando operaciones:

$$d_i d_o - 2fd_i = 2fd_o - d_i d_o \Rightarrow 2d_i d_o = 2fd_i + 2fd_o$$

Dividiendo la relación anterior por $2fd_i d_o$:

$$\frac{2d_i d_o}{2fd_i d_o} = \frac{2fd_i}{2fd_i d_o} + \frac{2fd_o}{2fd_i d_o}$$

Finalmente

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} \quad (16.8)$$

A la ecuación (16.8) se le conoce como *ecuación de los espejos esféricos* y establece la relación que existe entre la distancia focal de un espejo cóncavo con las distancias del objeto y la imagen al vértice del mismo. La relación (16.8) se dedujo para espejos cóncavos y $d_o > R$; sin embargo, es una aproximación válida para espejos cóncavos y convexos y para un objeto situado en cualquier posición, a lo largo del eje óptico, siempre y cuando se utilicen las siguientes consideraciones:

- a. La distancia d_o siempre es positiva
- b. La distancia d_i es positiva para una imagen real y negativa para una imagen virtual.
- c. La distancia focal, f , es positiva para un espejo cóncavo y negativa para un espejo convexo.
- d. La amplificación M es positiva para una imagen derecha y negativa para una imagen invertida.

Ejemplo 16.2

Un espejo cóncavo tiene un radio de curvatura de 40 cm. Si se coloca un objeto a 50 cm y a 20 cm del vértice, ¿dónde se forma la imagen y qué características tiene? ¿Cuál es la amplificación del espejo?

Solución

De acuerdo con la información dada: $R = 40$ cm, $d_o = 50$ cm o 20 cm. El caso $d_o = 50$ cm se corresponde con el de la fig. 16.13(a). La imagen es real y, por tanto, d_i es positiva. Como el espejo es cóncavo, la distancia focal, f , es positiva. La imagen es invertida y menor que el objeto.

Para calcular dónde se forma la imagen, despejamos d_i de la relación (16.8):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} \Rightarrow d_o d_i = f d_i + f d_o \Rightarrow (d_o - f) d_i = f d_o \Rightarrow d_i = \frac{f d_o}{d_o - f}$$

Como $R = 2f$

$$f = \frac{R}{2} = \frac{40}{2} = 20 \text{ cm}$$

Sustituyendo valores en la expresión para d_i :

$$d_i = \frac{20 \cdot 50}{50 - 20} = \frac{1.000}{30} = 33,33 \text{ cm}$$

La amplificación del espejo se obtiene de la relación (16.4):

$$\text{Amplificación} = -\frac{33,33}{50} = -0,66 \Rightarrow \frac{\text{Tamaño de la imagen}}{\text{Tamaño del objeto}} = 0,66$$

El tamaño de la imagen es, por tanto, 0,66 veces el tamaño del objeto:

$$\text{Tamaño Imagen} = 0,66 \cdot (\text{Tamaño objeto})$$

Si abordamos el otro caso ($d_o = 20$ cm), observamos que el objeto está situado en el foco del espejo, ya que $f = 20$ cm. De acuerdo a la fig. 16.14(c), no se forma imagen alguna.

Ejemplo 16.3

Se tiene un espejo divergente con una distancia focal de 12 cm y un objeto colocado a 28 cm del mismo. a) ¿A qué distancia aparece la imagen? b) ¿Qué características tiene la imagen del objeto?

Solución

a) Como el espejo es divergente, a la distancia focal se le atribuye un signo negativo.

Entonces, $d_o = 28$ cm, $f = -12$ cm. Del ejemplo (16.2) sabemos que $d_i = \frac{fd_o}{d_o - f}$. Sustituyendo valores:

$$d_i = \frac{(-12) \cdot 28}{28 - (-12)} = \frac{-336}{40} = -8,4 \text{ cm}$$

Lo que indica que la imagen se forma a 8,4 cm por detrás del espejo. La amplificación, M , está dada por:

$$M = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{(-8,4)}{28} = 0,3$$

Observa el signo negativo que antecede a d_i/d_o .

b) Como $d_i < 0$, la imagen es virtual. Dado que M es positiva, la imagen es derecha (no invertida) y como su valor es 0,3, su tamaño es igual a 0,3 veces el tamaño del objeto (más pequeña).



PIENSA Y EXPLICA



16.17 ¿A qué se denomina aumento o amplificación de un espejo?

16.18 Escribe la relación matemática que define la amplificación de un espejo esférico. Relaciona esa expresión con la fig. 16.18.

- 16.19** ¿Cuál es el significado del signo negativo en la relación (16.4)?
- 16.20** Deduce la ecuación de los espejos esféricos.
- 16.21** Escribe las consideraciones de signo de las distancias que se deben tener en cuenta, cuando se aplica la ecuación de los espejos.

**PROBLEMAS**

- 16.9** Delante de un espejo cóncavo, con radio de curvatura de 25 cm, se coloca un objeto de 4 cm de altura a una distancia de 15 cm. ¿Qué características tiene la imagen?
- 16.10** Se tiene un espejo cóncavo, de radio de curvatura 40 cm. ¿Cuáles son las características y la posición de la imagen de un objeto de 5 cm de altura, que se coloca a: a) 50 cm, b) 40 cm, c) 20 cm del espejo?
- 16.11** Un objeto de 4 cm de altura se coloca a 20 cm de un espejo convexo de distancia focal igual a 10 cm. a) ¿Cuál es la posición de la imagen? b) ¿Cuál es la amplificación del espejo?
- 16.12** Un espejo convexo tiene una distancia focal de 20 cm. Si se coloca un objeto a 30 cm del espejo determina: a) La posición de la imagen. b) La amplificación. c) Si la imagen es derecha o invertida.
- 16.13** Un espejo cóncavo tiene un radio de curvatura de 100 cm. a) ¿A qué distancia del espejo debe colocarse un objeto para que la imagen sea derecha y el doble de su tamaño real? b) Dibuja un esquema que muestre la ubicación del objeto y de la imagen.

- 16.14** El espejo retrovisor lateral de un automóvil tiene una distancia focal de -50 cm. Detrás del automóvil, el conductor observa otro vehículo de $1,5$ m de altura que está 15 m de distancia. ¿Cuáles son la posición y la altura de la imagen observada por el conductor?
- 16.15** Un espejo convexo, de radio de curvatura igual a 50 cm, recibe los rayos del Sol. ¿Qué características tiene la imagen formada?
- 16.16** Un cuadro de 50 cm de altura se coloca a 1 m de un espejo cóncavo de $f = 25$ cm. ¿Cuáles son las características y la ubicación de la imagen?

16.6 LAS LENTES ESFÉRICAS

Las lentes son dispositivos ópticos, constituidos por materiales transparentes, tales como vidrio o plástico apropiado, que, utilizando la propiedad de refracción de la luz, permiten la formación de imágenes. Las lentes se utilizan ampliamente en una gran variedad de instrumentos ópticos, tales como las cámaras fotográficas y de filmación, los microscopios, los anteojos, las lupas, los telescopios.

Las lentes esféricas, usualmente, tienen sus caras cóncavas o convexas o una combinación de ambas, incluyendo, además, la posibilidad de tener una de las dos caras planas. La fig. 16.20 muestra los diversos tipos de lentes.

Cuando un rayo de luz pasa a través de una lente, sufre una doble refracción: al entrar y al salir de la misma. A continuación, analizaremos cómo se difracta un rayo que atraviesa lentes biconvexas y biconcavas.

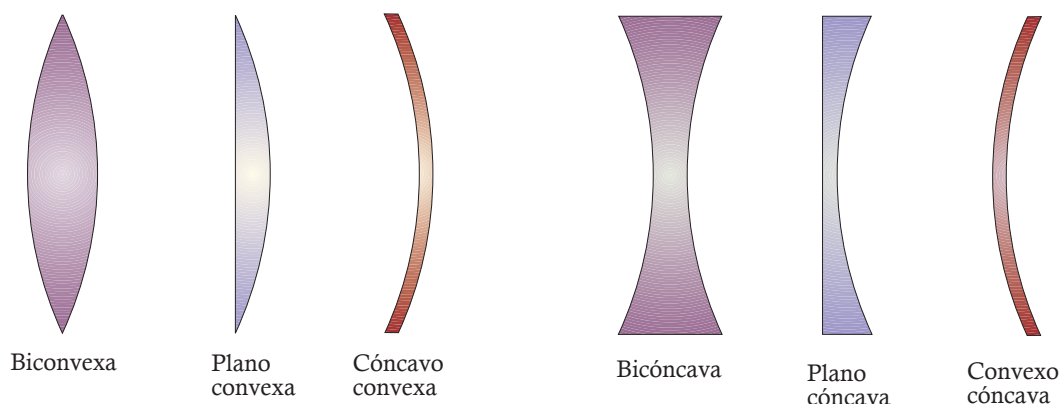


Fig. 16.20 Tipos de lentes.

Consideremos la fig. 16.21, donde se muestran 2 rayos luminosos, que inciden paralelos al eje de una lente biconvexa. Las líneas punteadas representan a la normal en los puntos de entrada y salida de los rayos. El rayo 1 se refracta en el lente, acercándose a la normal en el punto de incidencia. Luego, cuando el rayo sale de la lente biconvexa, se vuelve a refractar, alejándose de la normal. El rayo 2 también sufre 2 refracciones, acercándose y alejándose de la normal cuando entra y sale de la lente. Los dos rayos paralelos, una vez refractados, convergen en el punto F , que corresponde al *foco* de la lente biconvexa. A las lentes biconvexas se les denomina también *lentes convergentes*.

Generalmente, las lentes utilizadas en óptica son muy delgadas, por lo que su espesor puede despreciarse cuando se compara con otras distancias, envueltas en la geometría presente. A la distancia entre la lente y el foco se le llama *distancia focal*, f . Una lente biconvexa posee dos focos, dada la característica esférica de cada una de sus caras. Es decir, si los rayos paralelos entraran por la cara derecha de la lente de la fig. 16.21, se cortarían en el otro foco, ubicado del lado izquierdo de la misma. En la fig. 16.22, una fuente luminosa se coloca en uno de los focos de una lente biconvexa. El resultado son rayos paralelos, que emergen en la otra cara de la lente.

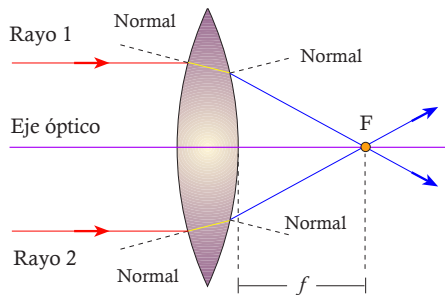


Fig. 16.21 En una lente biconvexa, los rayos que inciden paralelos al eje óptico, convergen en el foco de la lente.

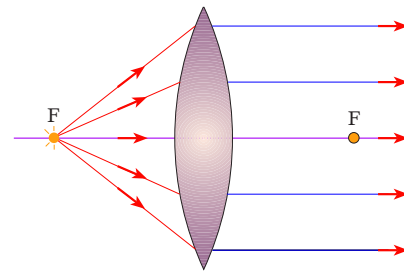


Fig. 16.22 Una fuente luminosa, colocada en el foco de una lente biconvexa, produce rayos paralelos en la otra cara de la lente.

Veamos, ahora, los efectos producidos por una lente bicóncava, sobre rayos paralelos incidentes en una de sus caras. De acuerdo con la fig. 16.23, los rayos sufren una doble refracción: al penetrar en la lente y al salir de la misma. Los rayos que emergen por la otra cara de la lente se separan al salir, por lo que a este tipo de lente se le dice *divergente*. La prolongación de los rayos divergentes se cortan en el foco de la lente. Nuevamente, la distancia focal es la distancia entre la lente y el foco F .

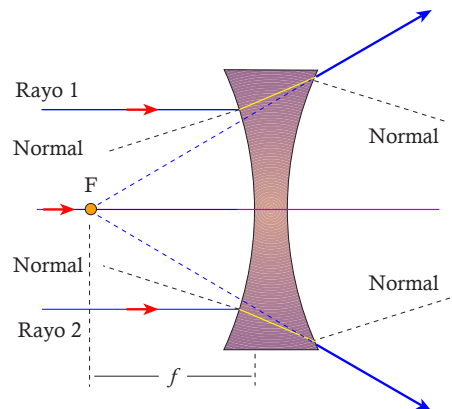


Fig. 16.23 En una lente bicóncava, los rayos que inciden paralelos al eje óptico, divergen al salir de la lente. La prolongación de los rayos divergentes se cortan en el foco F .

Las lentes esféricas, al igual que los espejos esféricos poseen un *centro de curvatura*, un *radio de curvatura*, un *foco* y una *distancia focal* para cada superficie esférica. Los focos se encuentran a igual distancia de la lente cuando el radio de curvatura es el mismo para las dos caras. En las lentes esféricas, contrario a lo que sucede con los espejos esféricos, la distancia focal, f , no es igual a la mitad del radio de la esfera ($f \neq R/2$). De allí que para caracterizar una lente, se toma en consideración sólo la distancia focal.

16.7 FORMACIÓN DE IMÁGENES EN LAS LENTES

Las lentes forman imágenes reales o virtuales, mediante un proceso distinto al de los espejos. Mientras en estos últimos las imágenes se forman por reflexión de la luz, en las lentes es la refracción la que da origen a las imágenes. La luz atraviesa las lentes, pero no los espejos. Las imágenes en las lentes se forman, bien en el lado donde está el objeto (*lado objeto*) o en el lado opuesto (*lado imagen*).

Al igual que con los espejos, para determinar la imagen de un punto, creada por una lente, necesitamos sólo conocer la trayectoria de dos rayos provenientes del mismo y utilizar las propiedades de las lentes, descritas en la sección anterior. A fin de facilitar el dibujo de la imagen formada, la fig. 16.24 muestra la refracción de rayos paralelos al eje óptico, rayos focales y rayos centrales, para lentes biconvexas y biconcavas.

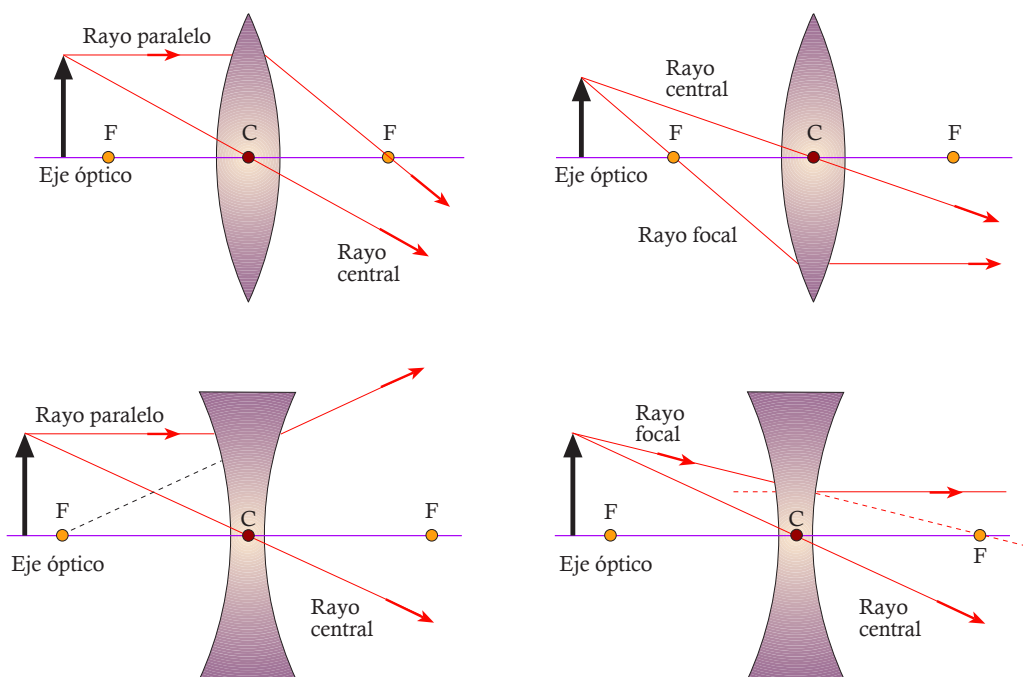


Fig. 16.24 Refracción de rayos paralelos y rayos focales en lentes biconvexas y biconcavas.

Para las lentes biconvexas, se tiene:

- a. Un rayo paralelo al eje óptico se refracta pasando por el foco del lado imagen.
- b. Un rayo focal se refracta paralelo al eje óptico.
- c. Un rayo central, que pasa por el centro del lente, no se desvía al refractarse.

Para las lentes biconcavas:

- a. Un rayo paralelo al eje óptico se refracta de forma tal que su prolongación pasa por el foco del lado objeto.
- b. Un rayo incidente sobre la lente, en una inclinación tal que su prolongación pase por el foco del lado imagen, se refracta paralelo al eje óptico.
- c. Un rayo central, que pasa por el centro C de la lente, no se desvía al refractarse.

A continuación, determinaremos las imágenes formadas por lentes biconvexas y biconcavas, para distancias del objeto mayor y menor que la distancia focal.

1. **Lente biconvexa.** $d_o > f$. En la fig. 16.25, la flecha MN está colocada a una distancia d_o que es mayor que la distancia focal f .

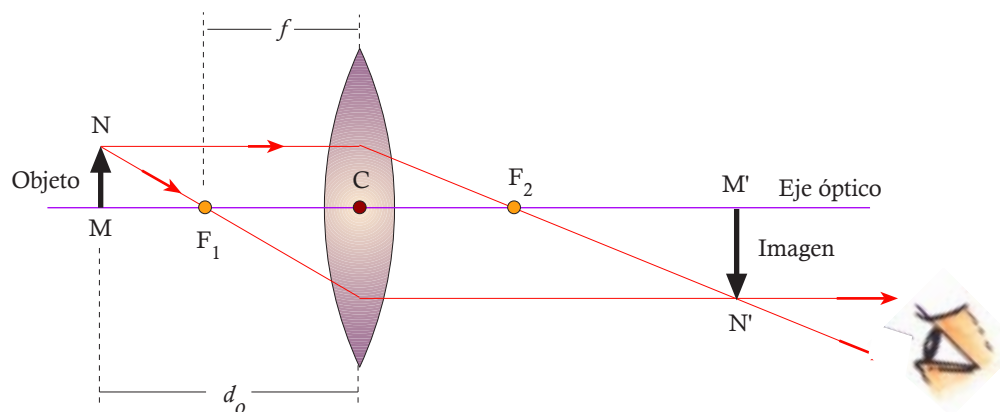


Fig. 16.25 Determinación de una imagen en una lente biconvexa ($d_o > f$).

Para determinar la imagen de la flecha MN, dibujamos dos rayos, uno paralelo al eje óptico, que se refracta pasando a través del foco F_2 y otro que, pasando por el foco F_1 , se refracta paralelo al eje óptico. Ambos rayos parten del extremo N de la flecha y su imagen se localiza en el punto N' del lado imagen de la lente. Cualquier otro punto, a lo largo de la flecha MN, tiene una imagen que se ubica dentro del segmento M'N'. Entonces un observador situado en el lado imagen, verá una flecha M'N', correspondiente a una imagen real, más grande e invertida en relación con la flecha MN. Si el objeto está situado a una distancia entre f y $2f$, la imagen será de mayor tamaño que el objeto. Si el objeto está situado a una distancia $d_o > 2f$, su imagen será de menor tamaño que el objeto.

2. Lente biconvexa. $d_o < f$.

En la fig. 16.26 el objeto MN da origen a la imagen M'N', mediante el siguiente procedimiento: el rayo proveniente de la punta de la flecha y, paralelo al eje óptico, se refracta pasando por el foco F_2 , mientras que el rayo que sale de la punta de la flecha, cuya prolongación pasa por el foco F_1 , se refracta paralelo al eje óptico. Aun cuando los rayos refractados no se cortan, sus prolongaciones sí lo hacen en el punto N', que se corresponde con la imagen de la punta de la flecha, N. El observador de la figura verá una imagen virtual M'N' de la flecha MN, derecha (no invertida) y de mayor tamaño.

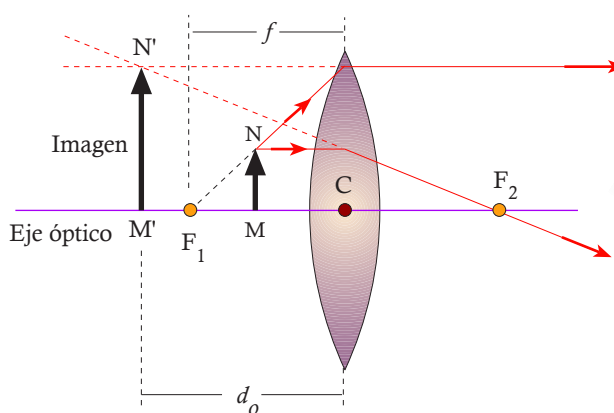


Fig. 16.26 Determinación de una imagen en una lente biconvexa ($d_o < f$).

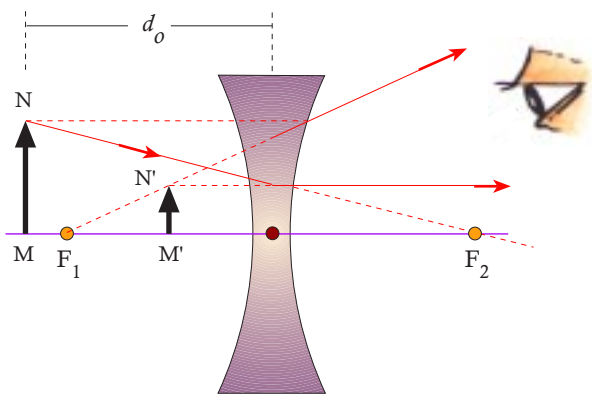


Fig. 16.27 Determinación de una imagen en una lente biconcava ($d_o > f$).

3. Lente bicóncava. $d_o > f$.

En este caso, fig. 16.27, el rayo paralelo al eje óptico se refracta de manera que su prolongación pasa por el foco F_1 , mientras que el rayo dirigido hacia el foco F_2 se refracta paralelo al eje óptico. La intersección de las prolongaciones de los dos rayos caen en el punto N'. La imagen M'N', de la flecha MN, es una imagen virtual, derecha y de menor tamaño.

4. Lente biconcava. $d_o < f$.

En la fig. 16.28 se muestra el procedimiento para obtener la imagen. A partir del punto N, correspondiente a la punta de la flecha, se dibuja un rayo paralelo al eje óptico, que se refracta en la lente, cuya prolongación pasa por el foco F_1 y un rayo focal, dirigido hacia el foco F_2 , que se refracta paralelo al eje óptico. La intersección de las prolongaciones de los rayos paralelos y focal, ubica a la imagen $M'N'$ de la flecha MN . La imagen obtenida es virtual, derecha y de menor tamaño que el objeto.

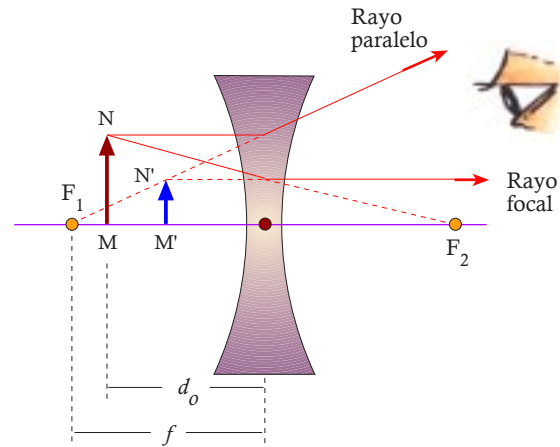


Fig. 16.28 Determinación de la imagen en una lente biconcava con $d_o < f$.

De los cuatro casos anteriores, podemos obtener las siguientes conclusiones:

- Para una lente, la imagen es real cuando se forma en el lado imagen y virtual cuando se forma en el lado objeto.
- Las lentes divergentes sólo pueden formar imágenes virtuales.

16.8 INSTRUMENTOS ÓPTICOS

A medida que el hombre incursionó en los vastos confines del universo y profundizó en la comprensión de la estructura de la materia, se vio obligado a inventar instrumentos ópticos, que le permitieran más certeza en lo que observaba. Así, avanzaron ciencias como la Astronomía, la Biología, la Medicina, la Parasitología y muchas otras actividades científicas y tecnológicas, producto del ingenio humano. A continuación, hacemos una breve descripción de algunos instrumentos ópticos, basados en las lentes estudiadas en las secciones anteriores.

16.8.1. La Lupa: a la lupa también se le conoce como lente de aumento o microscopio simple y consiste de una lente convergente (biconvexa) cuya distancia focal comúnmente está entre 5 cm y 20 cm. Para obtener una imagen aumentada de un objeto mediante una lupa, se coloca el mismo entre la lente y su foco. La imagen, como hemos visto, es virtual. En la fig. 16.29 se ilustra cómo una lupa crea la imagen de un objeto.

16.8.2. El Microscopio: cuando se requieren aumentos mayores, que nos permitan ver

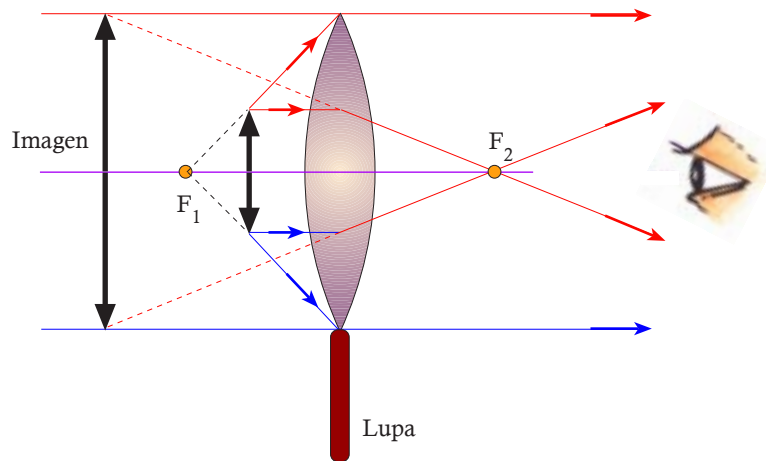


Fig. 16.29 Imagen aumentada, producida por una lupa.

objetos muy pequeños, utilizamos los microscopios. En su forma más simple, ver fig. 16.30, un microscopio está compuesto de dos lentes convergentes, a las cuales se les asignan los nombres de *objetivo* y *ocular*. El objeto se coloca cerca del foco del lente objetivo. La imagen 1, real, ampliada e invertida, se produce entre el lente ocular y su foco. Esta última lente proporciona una imagen 2, que es virtual, ampliada y, también, invertida con respecto al objeto. Entonces, las dos lentes se combinan para producir una imagen final, que es mucho mayor que el objeto.

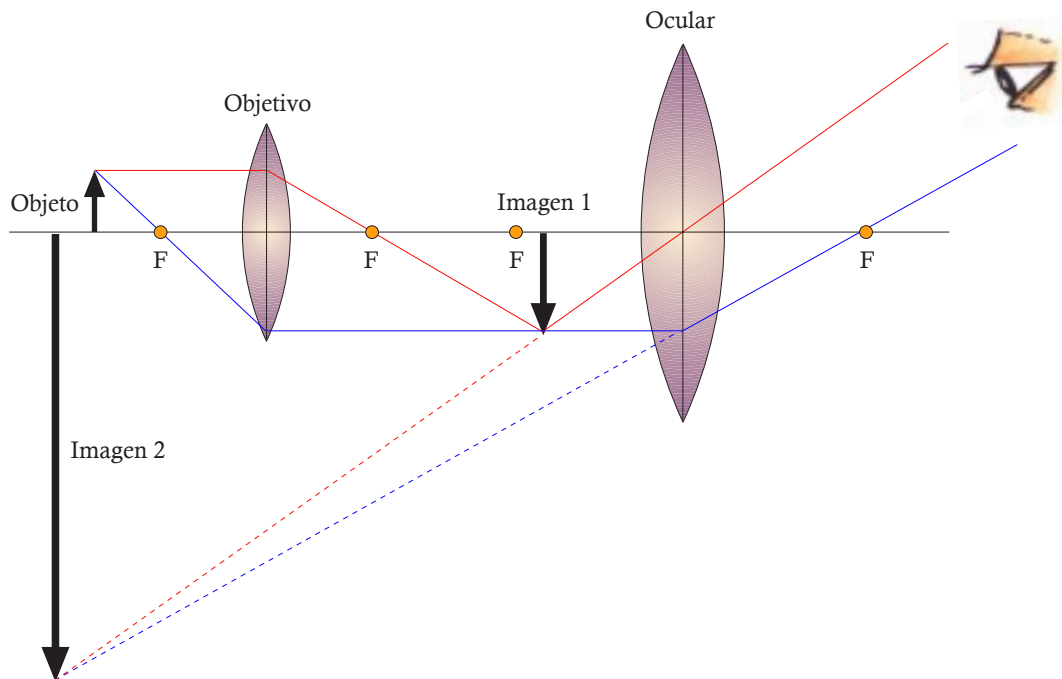


Fig. 16.30 Diagrama simplificado de un microscopio.

16.8.3. La Cámara Fotográfica: consiste, básicamente, de una lente convergente cuya función principal es enfocar la imagen de un objeto sobre una película fotosensible que, al sufrir ciertas reacciones químicas y al ser sometida a un proceso de “revelado”, reproduce la imagen de interés. El enfoque preciso sobre la película fotosensible se logra moviendo la lente convergente, mediante un mecanismo apropiado.

16.9 EL OJO HUMANO Y LA VISIÓN

El ojo humano es una de las tantas maravillas de la naturaleza; alcanza tales niveles de refinamiento en su estructura, que reta la imaginación del más hábil diseñador de mecanismos de precisión. Si intentáramos explicar el proceso de la visión, el cual nos permite captar las figuras de los objetos que nos rodean, tendríamos que considerar los aspectos ópticos, mecánicos y fisiológicos de la formación de imágenes en el ojo.

Como se ilustra en la fig. 16.31, la luz proveniente de un objeto pasa a través de la *córnea*, un tejido transparente, extensión de la parte blanca del ojo denominada, la *esclerótica*. Detrás de la córnea está el *iris*, diafragma circular que, al cerrarse o abrirse, regula la cantidad de luz que pasa por la *pupila*, orificio central del iris. El espacio entre el iris y la córnea está ocupado por un líquido, al que se le conoce como *humor acuoso*. A continuación, está el *cristalino*, una lente biconvexa que, mediante la variación automática de su distancia focal, dirige la luz para que la imagen se forme, exactamente, en la *retina*. Entre la retina y el cristalino se encuentra un líquido llamado *humor vítreo*.

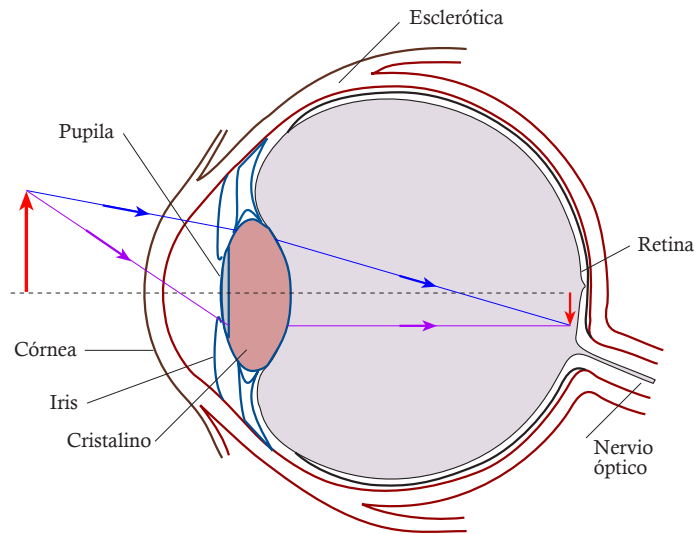


Fig. 16.31 Dibujo esquemático del ojo humano.

Entre la retina y el cristalino se encuentra un líquido llamado *humor vítreo*.

Las sensaciones luminosas activan células especiales, los *conos* y los *bastoncitos*, que las transmiten hasta el *nervio óptico*, desde donde son llevadas al cerebro para ser procesadas. Aun cuando la imagen que se forma en la retina está invertida con respecto al objeto, el cerebro, mediante complejos procesos fisiológicos, las hace aparecer tal como realmente es.

Es notable destacar el poder de acomodación del cristalino que permite enfocar sobre la retina las imágenes de objetos cercanos y lejanos. La relación entre distancia focal, f , y las distancias al objeto (d_o) y a la imagen (d_i) está dada por:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}$$

La distancia del cristalino a la retina, d_i , es una constante. Como la distancia, d_o , del cristalino al objeto varía, es necesario que la distancia focal f también varíe, para compensar las variaciones de d_o , de manera que la imagen siga formándose, exactamente, en la retina. Para lograr esto, los músculos que accionan el cristalino hacen que éste cambie su radio de curvatura y, por tanto, la distancia focal, f .

Los defectos visuales, que conducen al uso de lentes o a cingias correctivas, tienen lugar cuando las imágenes no se forman en la retina. Cuando éstas se forman delante de la retina, se habla de *miopía* y si se forman detrás de la retina, se habla de *hipermetropía*. La fig. 16.32 muestra estos defectos y la manera de corregirlos mediante lentes, cuya función es hacer incidir los rayos luminosos exactamente en la retina.

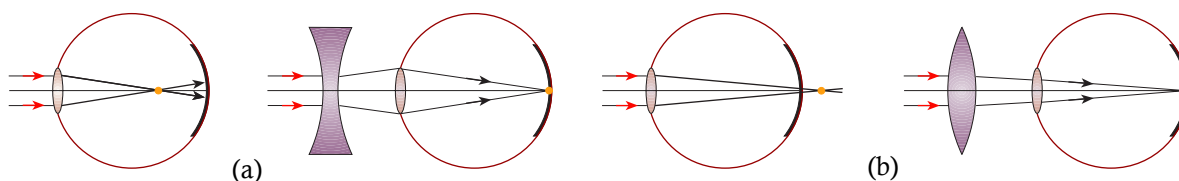


Fig. 16.32 a) Miopía y su corrección mediante una lente bicóncava. b) Hipermetropía y su corrección mediante una lente biconvexa.



PIENSA Y EXPLICA



- 16.22** ¿Qué es una lente? ¿Cuál es la diferencia con un espejo?
- 16.23** Menciona y dibuja los distintos tipos de lentes.
- 16.24** Explica, haciendo uso del dibujo apropiado, cómo se refractan los rayos que entran paralelos al eje óptico de una lente biconvexa y de una lente bicóncava?
- 16.25** Explica cómo se refractan los rayos provenientes de una fuente de luz, colocada en el foco de una lente biconvexa y de una lente bicóncava.

- 16.26** Explica cómo se refractan los rayos paralelo, central y focal, en una lente biconvexa y en una biconcava. Haz los dibujos correspondientes.
- 16.27** Explica la formación de una imagen en una lente biconvexa y en una biconcava, cuando: **a)** $d_o > f$, **b)** $d_o < f$, **c)** $d_o = f$.
- 16.28** Describe los principios fundamentales de los siguientes instrumentos ópticos: la lupa, el microscopio, la cámara fotográfica y el telescopio.
- 16.29** Describe cómo funciona el ojo humano. ¿Qué es el poder de acomodación del cristalino?
- 16.30** Describe la miopía y la hipermetropía como defectos de la visión y cómo se corrigen los mismos.

CAPÍTULO 17



Fenómenos Eléctricos

17.1 ESTRUCTURA ATÓMICA DE LA MATERIA

La teoría actual sobre la constitución de la materia establece que todas las sustancias están formadas por *átomos* y *moléculas*. Estas últimas son asociaciones de átomos arreglados de tal forma que cada disposición particular de los mismos da origen a diferentes tipos de materiales. Cada átomo consta de un *núcleo* con una cantidad determinada de *protones* y *neutrones*, de acuerdo a la sustancia de la cual se trata. Alrededor del núcleo en órbitas circulares o elípticas, giran los *electrones*. En la fig. 17.1 se muestran los modelos para los átomos de Neón y de Hidrógeno.

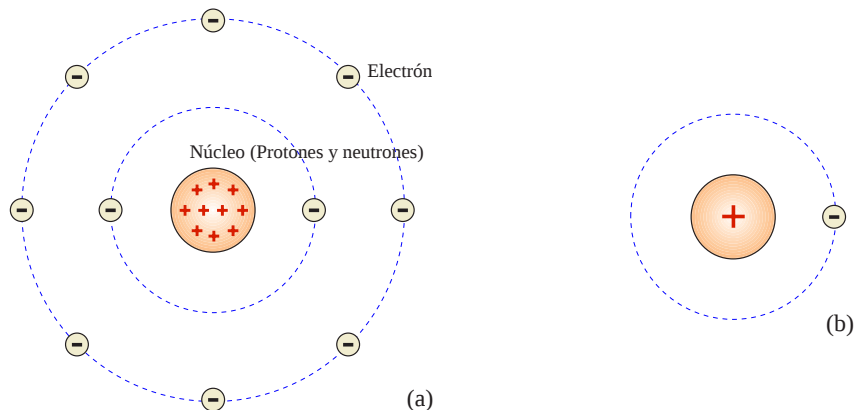


Fig. 17.1 a) Átomo de Neón. b) Átomo de Hidrógeno.

En el caso del átomo de Hidrógeno, el núcleo consta de un protón y un neutrón. Girando alrededor del núcleo se encuentra un solo electrón. Para el átomo de Neón el núcleo contiene 10 protones y 10 neutrones. Alrededor del núcleo hay dos órbitas externas. En la primera de ellas, la más cercana al núcleo, giran dos electrones, mientras que en la órbita más alejada del núcleo hay 8 electrones.

Los neutrones son partículas sin carga, los protones poseen carga positiva, mientras que los electrones tienen carga negativa. La carga de un protón es igual a la de un electrón, pero de signo opuesto.

En estado normal, todos los átomos son eléctricamente neutros; es decir, poseen el mismo número de electrones y protones. Los electrones más alejados del núcleo en la órbita más externa, son los responsables de las interacciones entre un átomo y otro, ya que la fuerza que los retiene ligados al núcleo es relativamente débil, en comparación con la fuerza ejercida sobre los electrones de órbitas internas.

Es interesante señalar que son las interacciones eléctricas y magnéticas (electromagnéticas) las responsables de que los átomos formen una unidad, que se agrupen para formar moléculas y que éstas últimas se unan entre sí para dar origen a todos los objetos y sustancias que conocemos. En general, la existencia de cuerpos inanimados y de seres vivos sobre la superficie terrestre, sólo es posible por la existencia de fuerzas electromagnéticas.

El núcleo de un átomo contiene un número de protones acorde con el elemento químico del cual se trate. La masa del neutrón y del protón es, aproximadamente, la misma y del orden de 2.000 veces mayor que la masa del electrón. Experimentos físicos realizados arrojan los siguientes resultados para las masas de esas partículas en reposo:

Masa del electrón (m_e) = $9,1091 \cdot 10^{-31}$ kg

Masa del protón (m_p) = $1,6725 \cdot 10^{-27}$ kg

Masa del neutrón (m_n) = $1,6748 \cdot 10^{-27}$ kg

En cuanto a las dimensiones de un átomo, se ha demostrado experimentalmente que el radio típico del núcleo es del orden de $5 \cdot 10^{-15}$ m, mientras que el radio promedio típico de la nube electrónica (formada por las distintas órbitas) es del orden de $2 \cdot 10^{-10}$ m.

17.2 CARGA ELÉCTRICA. ELECTRIZACIÓN.

No existen registros precisos sobre el descubrimiento de los fenómenos eléctricos. A Thales de Mileto, uno de los “siete sabios” de la antigua Grecia, se le atribuye el haber observado la atracción que ejercía el ámbar, previamente frotado, sobre cuerpos livianos como

pedacitos de papel. El ámbar es un tipo de resina fósil, de color amarillo y quebradizo, cuyo nombre en el idioma griego es “elektrón”. De esta palabra se derivan todos los términos relativos a los fenómenos eléctricos, que han captado la atención de la humanidad durante muchos años.

Aunque la electrización del ámbar como hecho experimental fue transmitido de una generación a otra, no se profundizó en la naturaleza del fenómeno en el transcurso de ¡2.000 años! No fue sino hasta comienzos del siglo XVII, cuando el filósofo y médico de la Corte de la Reina Elizabeth, William Gilbert, estableció que, aparte del ámbar, muchos cuerpos podían ser electrizados por fricción. Gilbert fue quien acuñó el término “eléctrico” para designar el efecto de atracción y repulsión de cuerpos cargados.



Fig. 17.2 Al frotar un peine y acercarlo a pedacitos de papel, éstos son atraídos por el peine.

El fenómeno de atracción de objetos cargados puede fácilmente ser puesto en evidencia experimentalmente: si recortamos pedacitos muy pequeños de papel, los colocamos sobre una superficie plana y le acercamos un peine que previamente ha sido frotado en el cuero cabelludo observaremos que los pedacitos de papel «vuelan» hacia el peine, tal como se indica en la fig. 17.2. Este simple experimento demuestra que el peine, o en su defecto otros objetos plásticos que se utilicen, han adquirido una propiedad a la cual se denomina *carga eléctrica*. Es decir, el peine se ha cargado eléctricamente o se ha *electrizado*.

Un experimento similar puede realizarse utilizando bolitas de anime de pequeño diámetro y colgándolas mediante hilos aislantes. Observemos el esquema planteado en la fig. 17.3: si frotamos una varilla de vidrio con un trapo de seda, la varilla se electriza. Si ahora tocamos las bolitas de anime con la varilla, éstas, a su vez, se electrizan. Si se colocan las bolitas de anime, una enfrente de la otra, se produce una fuerza de repulsión recíproca que las separa.

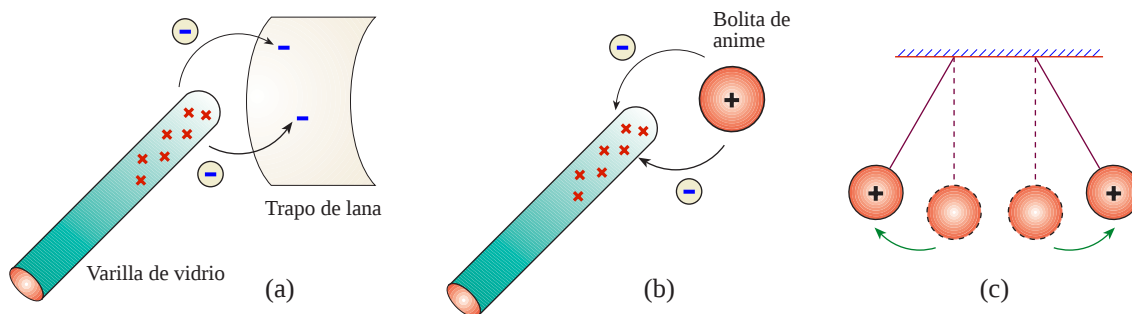


Fig. 17.3 a) Al frotar una varilla de vidrio con una tela de lana, la varilla queda cargada positivamente. b) Al tocar las bolitas de anime con la varilla de vidrio, las bolitas se cargan positivamente, al perder electrones. c) Al enfrentarse, las dos bolitas se repelen entre sí.

Desde el punto de vista de la estructura de la materia, el fenómeno que tiene lugar es el siguiente: al frotar la varilla de vidrio con la tela de lana, aquélla pierde electrones, que son transferidos a la tela, la cual queda cargada negativamente. Esto hace que la varilla adquiera una carga positiva, tal como se indica en la fig. 17.3(a). Al tocar las dos bolitas con la varilla de vidrio, fig. 17.3(b), los electrones de las mismas son transferidos a la varilla, quedando las pelotitas de anime con carga positiva. El hecho experimental mostrado en la fig. 17.3(c), que se manifiesta por la fuerza de repulsión que aparece en las bolitas cargadas positivamente, permite concluir que:

Dos objetos con cargas positivas se repelen.

Si ahora frotamos una varilla de plástico con un pedazo de cuero, en un experimento similar al anterior, como se ilustra en la fig. 17.4, tiene lugar el siguiente proceso: en primer término, se produce una migración de electrones desde el cuero hacia la varilla. Como resultado, esta última adquiere una carga negativa, mientras que el cuero queda cargado positivamente, fig. 17.4(a). Al poner en contacto la varilla de plástico con las bolitas de anime, fig. 17.4(b), éstas captan electrones y quedan con un exceso de carga negativa. Al enfrentar las bolitas, como se muestra en la fig. 17.4(c), las mismas experimentan, también, una fuerza de repulsión que las separa.

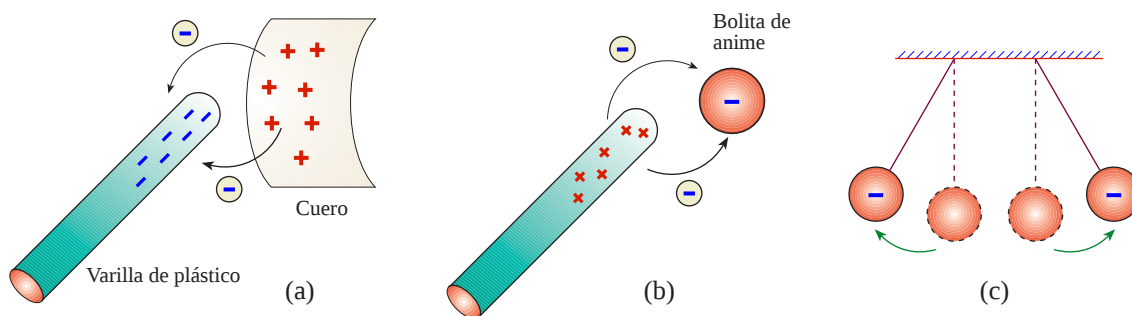


Fig. 17.4 a) Al frotar una varilla de plástico con un pedazo de cuero, la varilla queda con una carga negativa. b) Al tocar las bolitas de anime con la varilla de plástico, las mismas quedan cargadas negativamente, al ganar electrones. c) Las bolitas, cargadas negativamente, se repelen entre sí.

De lo anterior deducimos que:

Dos objetos con cargas negativas se repelen.

Finalmente, si tocamos una bolita de anime con la varilla de plástico y la otra con la varilla de vidrio, una vez que dichas varillas han sido cargadas por frotamiento, fig. 17.5, observaremos que al acercar las bolitas, éstas experimentan una fuerza de atracción.

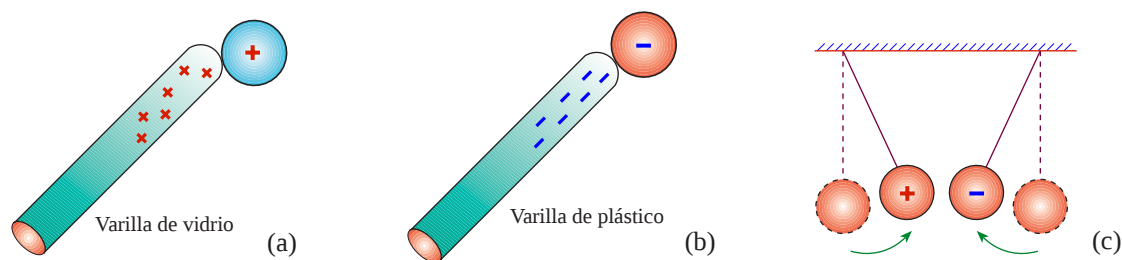


Fig. 17.5 Cuando se tocan dos bolitas de anime con varillas de vidrio y de plástico, se cargan con signos positivo y negativo, respectivamente y, al acercarlas, se produce una fuerza de atracción entre ellas.

Resumiendo los experimentos anteriores, podemos afirmar:

1. Los objetos pueden tener carga neta positiva, negativa o neutra.
2. Objetos con cargas del mismo signo se repelen.
3. Objetos con cargas de signos contrarios se atraen.

17.3 CUANTIZACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LA CARGA

Cuando decimos que una variable física está *cuantizada*, nos referimos a que ésta aparece en unidades discretas, que no pueden ser subdivididas. A la carga eléctrica no se le encuentra en cantidades arbitrarias, sino en múltiplos de una cantidad fundamental o *quantum*. Robert Millikan (1869-1993), un físico norteamericano, en un experimento clásico, conocido como experimento de la gota de aceite, demostró que la carga de un electrón está dada por:

$$\text{Carga de un electrón: } e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ coulombs}$$

La unidad de carga se expresa en el sistema SI en *coulombs*. A la cantidad e se le conoce también como *carga elemental*. Cualquiera carga encontrada en la naturaleza es igual a esta carga elemental o a un múltiplo de la misma. Basado en este hecho, se dice que *la carga está cuantizada*. La cuantización de la carga constituye una ley natural fundamental.

De acuerdo a lo estudiado en la sección 17.1, la carga de un protón es igual, pero de signo contrario, a la de un electrón. Por tanto, si asignamos un signo negativo a la carga de un electrón, podemos escribir:

Carga de un electrón : $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Carga de un protón : $+1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Cuando describimos el proceso de electrificación por frotamiento decíamos que hay una transferencia de electrones de un cuerpo a otro. Así, cuando frotábamos una varilla de vidrio con un trapo de lana, los electrones emigraban desde el vidrio hacia la lana, con la particularidad de que el número de electrones perdidos por el vidrio era exactamente igual a los que ganaba la lana. Este caso particular no es sino un ejemplo de un principio más general, el cual establece que *la carga neta de un sistema aislado permanece constante*.

Por carga neta de un sistema se entiende la suma algebraica de las cargas positivas y negativas que se encuentran en dicho sistema.

Hasta ahora no se ha observado algún caso de destrucción o de creación de la carga eléctrica neta de un sistema aislado. Podemos, entonces, enunciar la *ley de conservación de la carga*, que establece:

La carga eléctrica de un sistema aislado no puede ser creada ni destruida, sólo puede ser transferida.

Es conveniente mencionar que cuando decimos que un cuerpo posee un *exceso de carga*, estamos afirmando que tiene un exceso de electrones (cuerpo cargado negativamente) o un exceso de protones (cuerpo cargado positivamente), en relación con su estado eléctricamente neutro, en el cual el número de protones es igual al número de electrones.

17.4 CONDUCTORES Y AISLANTES

Normalmente, desde el punto de vista eléctrico, los materiales son clasificados como *conductores* y *aislantes*. Un buen conductor es un material, en el cual los electrones de la capa más externa se pueden mover con facilidad a lo largo y ancho de su estructura interna. Esta propiedad permite que, ante la presencia cercana de cuerpos cargados eléctricamente, se produzcan desplazamientos de los electrones libres. Los metales como el cobre, el aluminio, el hierro, etc., son buenos conductores.

Los *materiales aislantes* o *aisladores* son malos conductores de la electricidad y, aunque pueden intervenir en el proceso de intercambio de electrones con otros cuerpos, los elec-

trones de sus capas externas están tan atados al núcleo atómico, que el desplazamiento de los mismos, dentro de la estructura interna, es mínimo. Los plásticos y el papel seco son ejemplos de materiales aislantes. Un experimento que muestra la diferencia de comportamiento eléctrico entre conductores y aislantes, se indica en la fig. 17.6.

En la fig. 17.6(a), un cilindro metálico descansa sobre un vaso de vidrio, que lo aísla eléctricamente de la superficie sobre la cual éste último reposa. Una bolita muy liviana de un material aislante (por ejemplo, anime), recubierta con una capa metálica muy fina (por ejemplo, papel de aluminio) se pone en contacto con el cilindro metálico.

A continuación, fig. 17.6(b), una varilla de vidrio con carga positiva se pone en contacto con el cilindro metálico. Inmediatamente la bolita es repelida. ¿Qué ha sucedido? Debido a que la bolita y el cilindro son buenos conductores, sus electrones libres son atraídos por la varilla de vidrio. Estos electrones viajan fácilmente de un extremo al otro del cilindro. Como resultado de este movimiento de electrones hacia la varilla de vidrio, tanto la bolita como el extremo izquierdo del cilindro aparecen con un exceso de carga positiva, que causa la repulsión de la bolita.

Si ahora sustituimos el cilindro metálico por uno de plástico y lo tocamos con la varilla de vidrio cargada, observamos que la bolita no se mueve. La explicación es la siguiente: como el plástico no es buen conductor, sólo se produce transferencia de electrones en el punto de contacto con la varilla de vidrio; en el resto del cilindro no hay migración de cargas y, por tanto, en el extremo izquierdo del cilindro no tiene lugar efecto alguno.

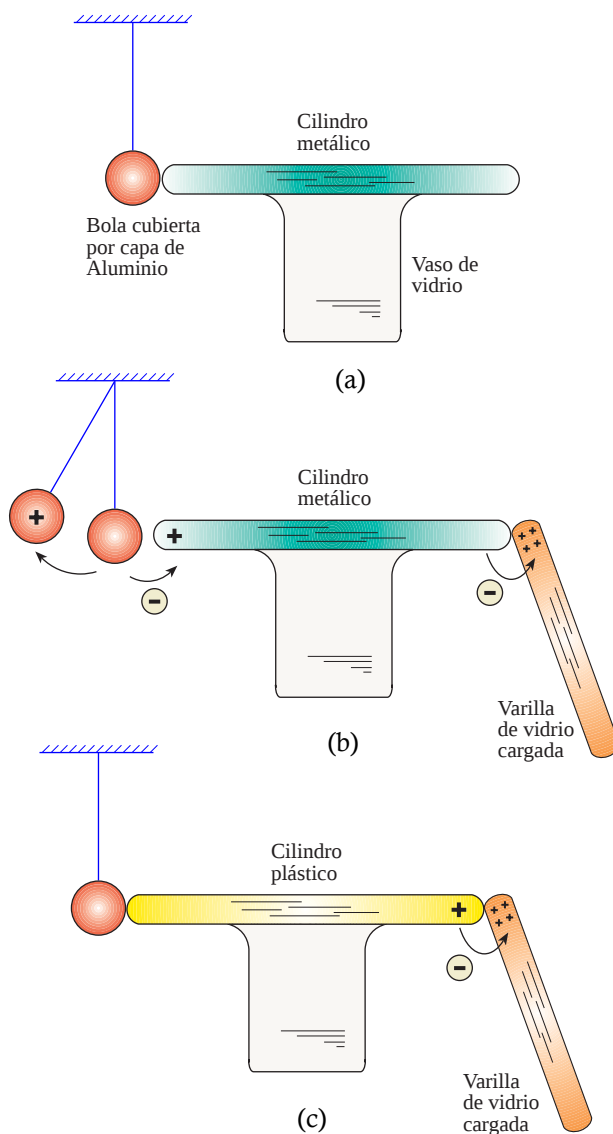


Fig. 17.6 a) Una bolita de material aislante con cubierta metálica se pone en contacto con un cilindro metálico, que descansa sobre un vaso de vidrio. b) Al poner en contacto una varilla de vidrio cargada con el cilindro metálico, la bolita es repelida. c) Cuando el cilindro metálico es sustituido por uno de plástico y se le toca con la misma varilla cargada, la bolita permanece en su lugar.

17.5 INDUCCIÓN ELECTROSTÁTICA

La *inducción electrostática* es un método que se utiliza para cargar un conductor, sin ponerlo en contacto con un objeto electrizado. Supongamos dos cilindros metálicos, colocados sobre soportes aislantes y puestos en íntimo contacto, como se muestra en la fig. 17.7.

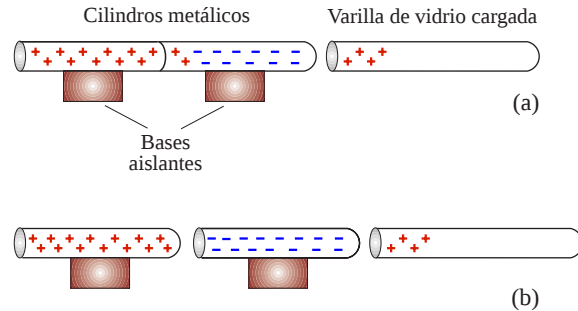


Fig. 17.7 Experimentos para demostrar la inducción electrostática.

Si acercamos una varilla de vidrio con carga positiva al cilindro metálico del lado derecho, fig. 17.7(a), los electrones de ambos cilindros se mueven hacia la derecha, dejando al cilindro de la izquierda con un exceso de carga positiva y al de la derecha con un exceso de carga negativa. Si ahora separamos los cilindros metálicos, fig. 17.7(b), éstos quedan cargados: el de la izquierda con carga positiva y el de la derecha con carga negativa.

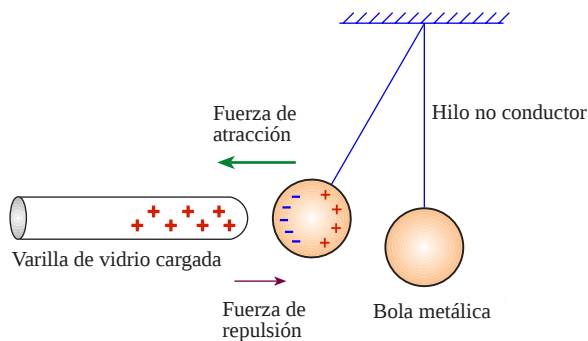


Fig. 17.8 Atracción de un conductor neutro por un cuerpo cargado.

bargo, por encontrarse las cargas negativas más cercanas que las positivas a la varilla de vidrio, la fuerza de atracción es mayor que la de repulsión.

Entre cuerpos aislantes se pueden producir, también, fuerzas eléctricas. Esto explica la atracción que se produce sobre pedacitos de papel, cuando se le acerca un cuerpo con carga positiva. Supongamos, por ejemplo, que se carga positivamente una varilla de vidrio. En la fig. 17.9 se ilustra esta situación. Las cargas negativas, aun cuando no pueden moverse libremente en el papel, se reacomodan en las moléculas del mismo

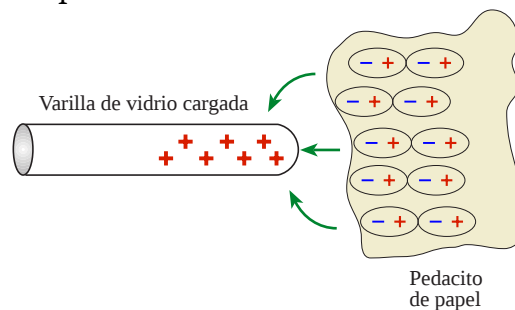


Fig. 17.9 Explicación de la atracción de un cuerpo aislante (pedacito de papel) por otro cuerpo aislante cargado (varilla de vidrio).

para cargar negativamente la cara izquierda del pedacito de papel. Como estas cargas negativas están más cerca de la varilla de vidrio, la fuerza de atracción es mayor que la fuerza de repulsión de las cargas positivas. La consecuencia es que los pedacitos de papel “saltan” hacia la varilla de vidrio.

17.6 EL ELECTROSCOPIO

El *electroscopio* es un instrumento utilizado para detectar la presencia de cargas eléctricas. En su versión más simple consiste de dos laminillas metálicas que cuelgan de un eje conductor, terminado en una bolita esférica conductora. Todo el conjunto descansa sobre una jarra de vidrio, como se muestra en la fig. 17.10.

Veamos esquemáticamente cómo se carga un electroscopio. En la fig. 17.11(a) una varilla de vidrio con carga positiva toca a la esfera del electroscopio, haciendo que las láminas se separen. Esto se explica porque al tocar la esfera metálica con la varilla de vidrio, se transfieren electrones a esta última, dejando a ambas laminillas con cargas positivas, que generan una fuerza de repulsión entre las mismas. Cuando la esfera metálica se toca con una varilla de plástico cargada negativamente, fig. 17.11(b), hay una transferencia de electrones desde la varilla de plástico hacia el material conductor. Las dos laminillas metálicas se cargan negativamente y, de nuevo, se origina una fuerza de repulsión entre las mismas. En los dos casos mostrados, las laminillas adquieren cargas del mismo signo, que producen fuerzas de repulsión.

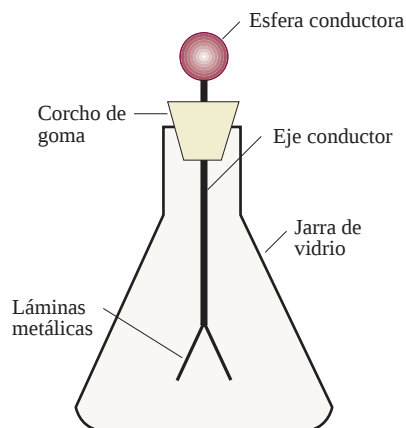


Fig. 17.10 Electroscopio de láminas metálicas.

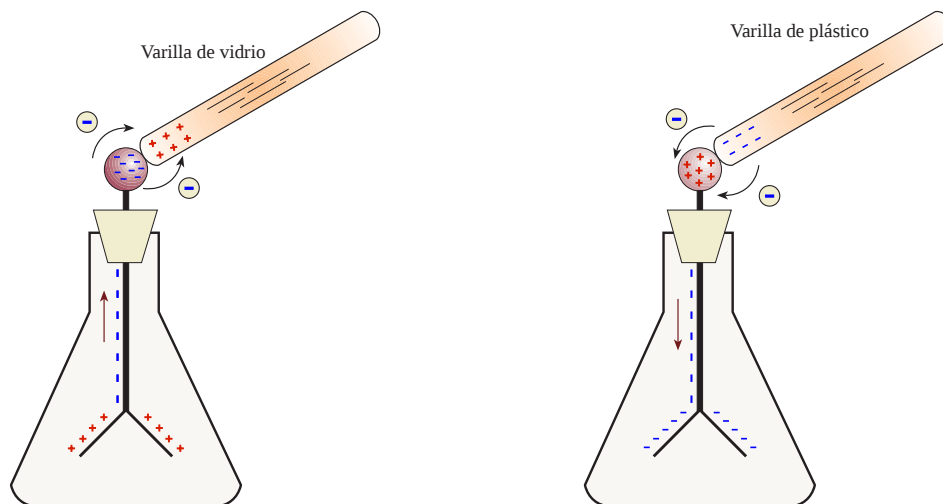


Fig. 17.11 Manera de cargar un electroscopio: a) Positivamente. b) Negativamente.

Un electroscopio cargado puede utilizarse para determinar si un cuerpo está cargado y el tipo de carga que posee. En la fig. 17.12(a), a un electroscopio con carga positiva se le acerca una varilla de vidrio, que tiene, también, una carga positiva. Al trasladarse electrones hacia la esfera del electroscopio las laminillas del mismo adquieren una carga positiva mayor y se separan aun más. Por el contrario, cuando se acerca una varilla de plástico cargada negativamente, se desplazan electrones hacia las laminillas, que neutralizan algunas cargas positivas en las mismas. Como consecuencia, la fuerza de repulsión de las laminillas se hace menor y éstas se acercan, tal como lo ilustra la fig. 17.12(b).

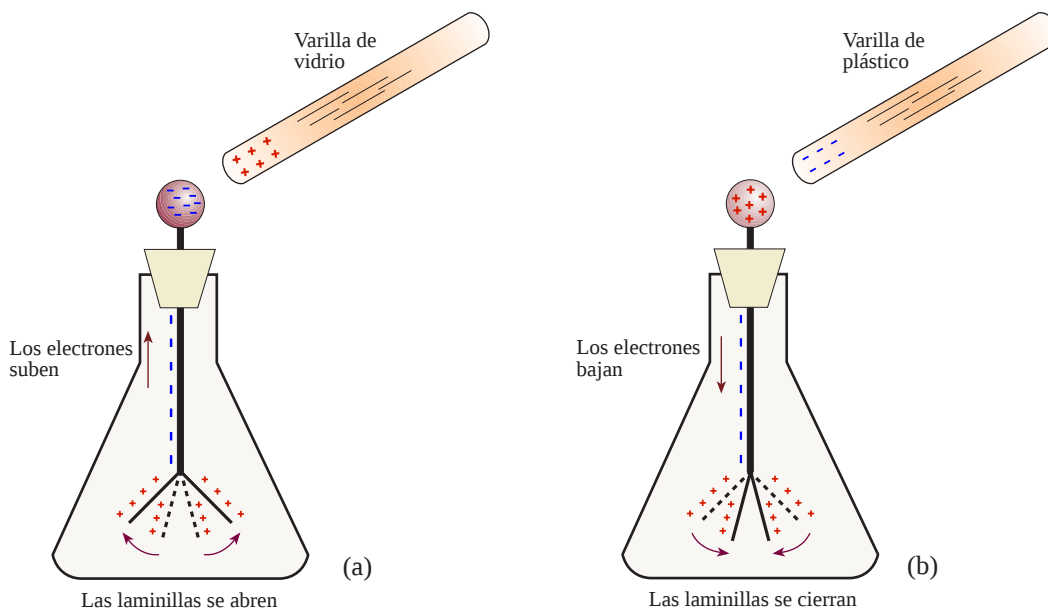


Fig. 17.12 Detección de cargas positivas y negativas mediante un electroscopio.

17.7 LEY DE COULOMB

Charles Coulomb (1736-1806) fue un coronel de las fuerzas armadas francesas que, en 1784, realizó una serie de experimentos mediante una balanza de torsión, inventada por él mismo, para determinar cuantitativamente la fuerza mutua entre dos cuerpos cargados. Sus resultados se conocen como la ley de Coulomb, que establece lo siguiente:

La fuerza eléctrica mutua que surge entre dos objetos cargados, muy pequeños, separados por una distancia relativamente grande en relación con sus tamaños (cargas puntuales) está dirigida a lo largo de la línea que une a las dos cargas. Es de atracción si las cargas tienen signos distintos y de repulsión si tienen signos iguales. La fuerza es directamente proporcional al valor de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

La magnitud de la fuerza, dada por la ley de Coulomb, puede escribirse como:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (17.1)$$

Donde:

q_1, q_2 : cargas positivas o negativas que interactúan.

r : distancia que separa las cargas.

k : constante de proporcionalidad

En el Sistema Internacional de Medidas (SI) la carga q se mide en *coulombs*, la distancia r en metros (m) y la fuerza F en newtons (N).

La ley de Coulomb dada por (17.2) es válida en el vacío. La constante de proporcionalidad, k , que es independiente de las cargas y de la distancia, se define como función de otra constante ϵ_0 , conocida como *permitividad eléctrica en el vacío*, de la siguiente manera:

$$k = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \quad (17.2)$$

Entonces, la relación (17.1) puede escribirse como:

$$F = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (17.3)$$

El valor experimental obtenido para la permitividad en el vacío es:

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2 \quad (17.4)$$

El cual puede aproximarse por:

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ C}^2/\text{Nm}^2 \quad (17.5)$$

Con el valor anterior, la constante k se convierte en:

$$k = \frac{1}{4\pi \frac{10^{-9}}{36\pi}} \Rightarrow k \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \quad (17.6)$$

La unidad fundamental de carga, *el coulomb*, es, en realidad, una cantidad tan grande, que la fuerza de repulsión que generarían dos cargas positivas de 1 C, separadas una distancia de 1 m, sería extraordinaria. En efecto, para estos valores se tendría:

$$F = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \frac{(1 \text{ C})(1 \text{ C})}{(1 \text{ m})^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ N}$$

Si se considera un automóvil de masa promedio 1.500 kg, el peso correspondiente es:

$$p = m \cdot g = 1.500 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 15.000 \text{ N}$$

La fuerza de repulsión de las cargas de 1 C equivaldría, entonces, al peso de:

$$\frac{9 \cdot 10^9}{15 \cdot 10^3} = 600.000 \text{ automóviles}$$

Lo anterior explica el uso frecuente de submúltiplos de la unidad fundamental, usualmente el microcoulomb (μC), el nanocoulomb (nC) y el picocoulomb (pC):

$$1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$$

$$1 \text{ nC} = 10^{-9} \text{ C}$$

$$1 \text{ pC} = 10^{-12} \text{ C}$$

Es importante enfatizar que cuando todas las unidades en vueltas en la expresión matemática de la ley de Coulomb se expresan en newtons (N), Coulombs (C) y metros (m) y la constante k viene dada en $\text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$, el resultado de cualquier operación para determinar la fuerza, las cargas o la distancia, se expresará en esas unidades (N, C, M), respectivamente. De allí que si se mantiene un esquema de unidades compatible con lo mencionado, no hay necesidad de escribir esas unidades cada vez que se resuelve un problema.

Ejemplo 17.1

Se tienen dos cargas puntuales positivas de valores $q_1 = 10 \mu\text{C}$ y $q_2 = 5 \mu\text{C}$, situados en los puntos $P_1(0,0)$ y $P_2(4,4)$ como se indica en la fig. 17.13. Las medidas están dadas en cm.

a) ¿Es la fuerza entre las mismas de repulsión o de atracción? b) Determina la magnitud y dirección de la fuerza de q_1 sobre q_2 . c) ¿Cuál es la magnitud y dirección de la fuerza de q_2 sobre q_1 ?

Solución

a) En la fig 17.13a se muestra la disposición de las cargas Como las cargas son positivas, la fuerza entre las mismas es de repulsión.

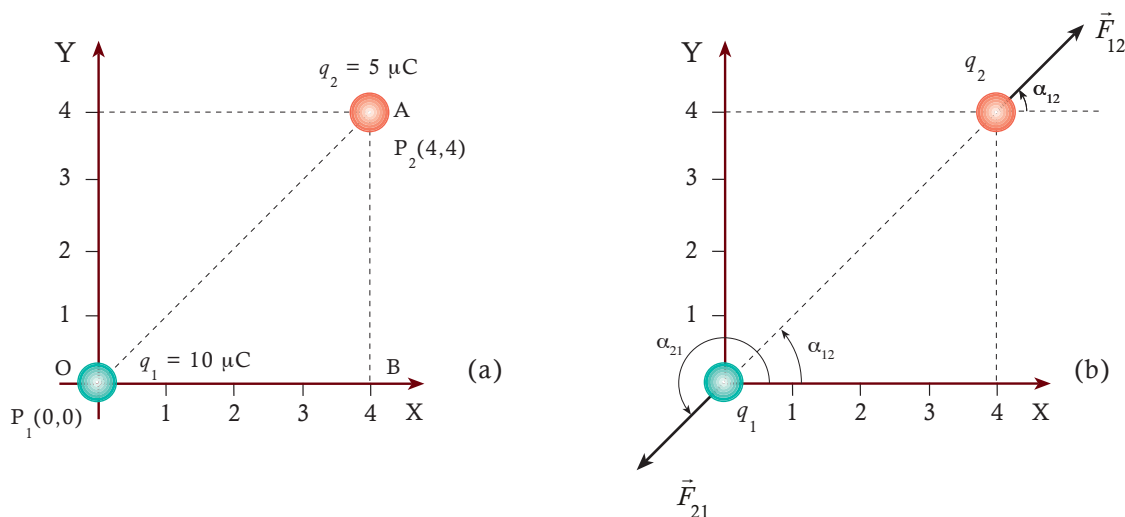


Fig. 17.13 a) Disposición de las cargas para el ejemplo 17.1. b) Dirección de las fuerzas sobre q_1 y q_2 .

b) Primero, expresamos q_1 y q_2 en coulombs:

$$q_1 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ C} \qquad q_2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

La distancia entre los puntos P_1 y P_2 es:

$$r = \sqrt{(4-0)^2 + (4-0)^2} = \sqrt{16+16} = \sqrt{32} \text{ cm} = \sqrt{32} \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

La fuerza es una cantidad vectorial y tiene, por tanto, módulo y dirección. Si llamamos $\vec{F}_{12}$ a la fuerza de repulsión que ejerce q_1 sobre q_2 , su módulo viene dado por la relación (17.1):

$$F_{12} = 9 \cdot 10^9 \frac{10^{-5} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{(\sqrt{32} \cdot 10^{-2})^2} = \frac{45 \cdot 10^{-2}}{32 \cdot 10^{-4}} = 140,63 \text{ N}$$

De la fig. 17.13 se observa que el ángulo α_{12} que forma la fuerza $\vec{F}_{12}$ con el eje X es de 45° , ya que el triángulo OAB es isósceles y rectángulo, por lo que los dos lados OB y AB tienen igual longitud.

c) Por el principio de acción y reacción, la fuerza $\vec{F}_{21}$ que ejerce la carga q_2 sobre la carga q_1 , es igual en módulo, pero opuesta en dirección. Entonces:

$$F_{21} = 140,63 \text{ N}$$

De la fig. 17.13 (b) observamos que el ángulo α_{21} está dado por:

$$\alpha_{21} = \alpha_{12} + 180^\circ = 45^\circ + 180^\circ = 225^\circ$$

Ejemplo 17.2

Se tienen tres cargas puntuales sobre el eje X. La carga $q_1 = -2 \mu\text{C}$ está en $P_1 (-3, 0)$, $q_2 = 4 \mu\text{C}$ está en $P_2 (0, 0)$ y $q_3 = 2 \mu\text{C}$ está en $P_3 (3, 0)$. Determina la fuerza resultante sobre q_2 . Las distancias están en metros.

Solución

En la fig. 17.14(a) se indica la distribución de las cargas.

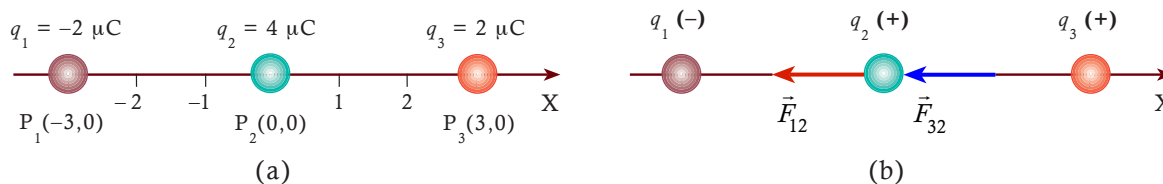


Fig. 17.14 a) Disposición de las cargas para el ejemplo 17.2. b) Diagrama de fuerzas sobre q_2 .

La fuerza ejercida por q_1 , sobre q_2 es una fuerza de atracción, por ser cargas de signos opuestos. Está, por tanto, dirigida en dirección contraria al eje de las X. La distancia entre q_1 y q_2 es de 3 m y el módulo de la fuerza es:

$$F_{12} = 9 \cdot 10^9 \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{9} = 0,008 \text{ N}$$

La fuerza ejercida por q_3 sobre q_2 es de repulsión, por tratarse de cargas de igual signo. La distancia entre las cargas es, también, de 3 m y su módulo es:

$$F_{32} = 9 \cdot 10^9 \frac{4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{9} = 0,008 \text{ N}$$

Como puede observarse de la fig. 17.14(b), las fuerzas $\vec{F}_{12}$ y $\vec{F}_{32}$ sobre la carga q_2 , tienen la misma dirección y la fuerza resultante será:

$$F_R = F_{12} + F_{32} = 0,016 \text{ N}$$

Vectorialmente se tendrá:

$$\vec{F}_R = -0,016\vec{i} \text{ N}$$



PIENSA Y EXPLICA



- 17.1 Describe la estructura atómica de la materia.
- 17.2 ¿Qué carga tienen las partículas atómicas?
- 17.3 ¿Cómo se comparan las masas de las partículas atómicas?
- 17.4 ¿De dónde deriva la palabra “electrón”?
- 17.5 ¿Cuándo se dice que un objeto está electrizado?
- 17.6 ¿Por qué al frotar una varilla de vidrio con un trapo de lana, la varilla se carga positivamente?
- 17.7 ¿Por qué al frotar una varilla de plástico con un pedazo de cuero, aquella se carga negativamente?
- 17.8 Explica cómo cargarías una esferita de anime: a) Con carga positiva. b) Con carga negativa.
- 17.9 ¿Cuándo se dice que un cuerpo tiene exceso de carga negativa?
- 17.10 ¿Cuándo se dice que un cuerpo tiene exceso de carga positiva?
- 17.11 ¿Por qué se dice que la carga está cuantizada?
- 17.12 ¿Cuál es la carga de un electrón? ¿De un protón?
- 17.13 ¿Qué dice el principio de conservación de la carga?
- 17.14 ¿Qué caracteriza a un conductor? ¿A un aislante?
- 17.15 Da ejemplos de materiales conductores y aislantes.

- 17.16** ¿Cuándo se dice que un cuerpo es eléctricamente neutro?
- 17.17** ¿Qué es la inducción electrostática?
- 17.18** Explica la causa de atracción, sobre pedacitos de papel, de una varilla de vidrio cargada positivamente.
- 17.19** ¿Por qué una varilla de aluminio es mejor conductora que una varilla de madera?
- 17.20** Al frotar un globo de plástico con un pedazo de lana y soltarlo, éste se pega a una pared y, luego, cae. ¿Cuál es la causa?
- 17.21** Si una esfera metálica es atraída por una varilla cargada positivamente, ¿significa esto que la esfera tiene un exceso de carga?
- 17.22** Una esfera conductora, atada a un hilo aislante es atraída por una varilla con carga positiva. ¿Es necesario que la esfera esté cargada negativamente para que esto suceda? Explica.
- 17.23** Si a un electroscope se le acerca un cuerpo con carga, **a)** negativa, **b)** positiva, ¿qué le sucede a las laminillas?
- 17.24** A un electroscope cargado negativamente se le acerca un cuerpo cargado. Si las laminillas, **a)** se abren, **b)** se acercan, ¿cuál es el signo del cuerpo cargado?
- 17.25** ¿Qué se entiende por carga neta de un cuerpo?
- 17.26** Enuncia la ley de Coulomb.
- 17.27** ¿Es válida la ley de Coulomb cuando $r = 0$. Explica.
- 17.28** ¿Cuáles son los valores de las constantes ϵ_0 y k , que figuran en la ley de Coulomb?
- 17.29** ¿Qué es una carga puntual?
- 17.30** ¿Cuál es la equivalencia de $1 \mu\text{C}$, 1 nC , 1 pC con el Coulomb?



PROBLEMAS



- 17.1** a) Si una esfera metálica tiene una carga de $+1,2 \text{ nC}$, ¿cuántos electrones ha perdido? b) Si la misma esfera tiene una carga de $-2 \mu\text{C}$, ¿cuántos electrones ha ganado?
- 17.2** ¿Cuál es la fuerza eléctrica entre los dos protones de una molécula de hidrógeno (H_2) si su separación es, aproximadamente, igual a 10^{-10} m ?
- 17.3** Se tienen tres cargas puntuales, dispuestas como se muestra en la fig. 17.15. $q_1 = 12 \text{ nC}$, $q_2 = -20 \text{ nC}$ y $q_3 = 24 \text{ nC}$. Determina la magnitud y la dirección de las fuerzas resultantes sobre q_2 y q_3 .

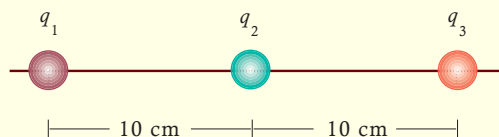


Fig. 17.15 Problema 17.3.

- 17.4** La fuerza eléctrica entre dos partículas cargadas es de $10 \mu\text{N}$, cuando están separadas 10 cm . Si una de las partículas tiene una carga de 1 nC , ¿Cuál es la carga de la otra partícula?
- 17.5** Dos cargas positivas $q_1 = 1 \text{ nC}$ y $q_2 = 2 \text{ nC}$ están separadas 30 cm . ¿Dónde debemos colocar una tercera carga, $q_3 = 1 \text{ nC}$, de forma que la fuerza resultante sobre la misma sea nula.

17.8 CAMPO ELÉCTRICO. LÍNEAS DE FUERZA.

A menudo se utiliza la expresión *campo gravitacional* para designar una región del espacio donde tienen lugar fuerzas de origen gravitacional, las cuales surgen debido a la interacción entre las masas presentes en dicha región espacial. Similarmente, el espacio alrededor de objetos cargados es capaz de generar fuerzas en otros cuerpos cargados y se habla,

entonces, de un *campo eléctrico*, para referirse a la región espacial donde se producen fuerzas de origen eléctrico. La *intensidad del campo eléctrico* se define como la fuerza que experimenta una carga de prueba positiva al colocarse bajo la acción de tal campo, dividida entre el valor de dicha carga.

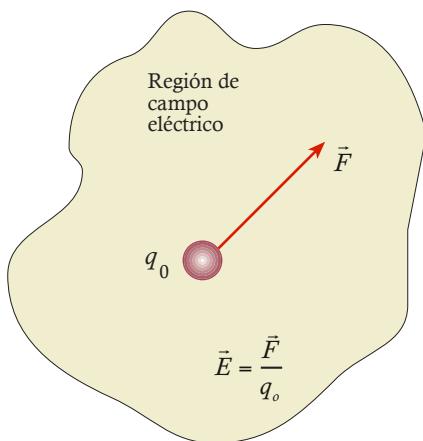


Fig. 17.16 La intensidad del campo eléctrico se define como la relación entre la fuerza resultante sobre una carga de prueba positiva y el valor de dicha carga.

En la fig. 17.16 la carga q_0 experimenta una fuerza $\vec{F}$ dentro de un campo eléctrico. De acuerdo a la definición anterior y designando a la intensidad del campo eléctrico mediante el vector $\vec{E}$, podemos escribir:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (17.7)$$

Como F se expresa en newtons (N) y q_0 , en coulombs (C), la unidad SI de intensidad de campo eléctrico es el newton/coulomb (N/C). Hay que observar que si la carga que crea el campo es positiva, la carga de prueba q_0 , también positiva, experimenta una fuerza que la hace alejarse de la primera. Por el contrario, si la carga que crea el campo es negativa, la fuerza que experimenta q_0 , la hace acercarse a la misma.

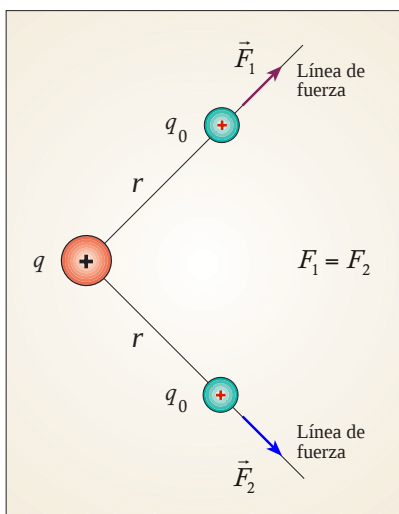


Fig. 17.17 La carga q_0 , situada a una distancia r de q experimenta una fuerza radial que la aleja de esta última.

Considera una carga eléctrica q , que crea un campo eléctrico a su alrededor, como se muestra en la fig. 17.17. Una carga positiva q_0 colocada a una distancia r de q , experimentará una fuerza de la misma magnitud y de dirección radial, que trata de alejarla de q . Con el fin de enfatizar la presencia del campo eléctrico alrededor de la carga q , es usual hacer abstracción de la carga q_0 y dibujar líneas que, partiendo de q , indiquen cómo está dirigida la fuerza a su alrededor. A tales líneas se les denomina *líneas de fuerza*. Como se puede ver en la fig. 17.7, las líneas de fuerza son tangentes a la fuerza en un punto dado y, por tanto, tangentes al vector intensidad del campo eléctrico ($\vec{E} = \vec{F} / q$). En general, podemos hacer la siguiente definición:

Las líneas de fuerza de un campo eléctrico son líneas tangentes al vector intensidad del campo eléctrico e indican la dirección de la fuerza en cada uno de sus puntos.

En la fig. 17.18 se muestran las líneas de fuerza para una carga positiva y una negativa.

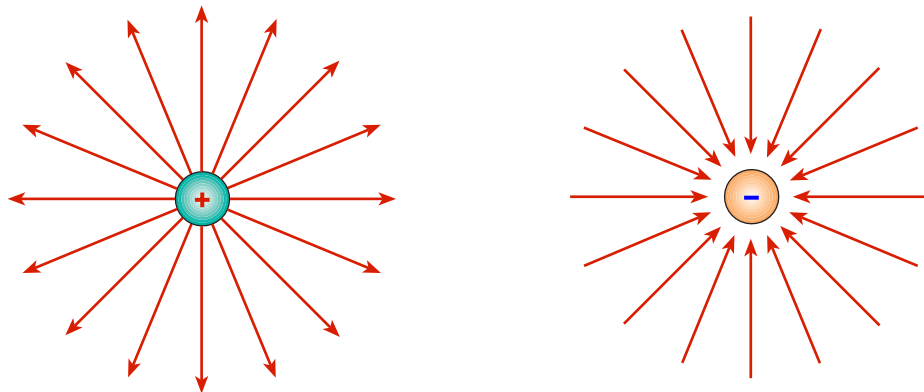


Fig. 17.18 Líneas de fuerza alrededor de una carga positiva y una carga negativa.

Cualquier carga positiva colocada en el campo eléctrico de otra carga positiva está sujeta a una fuerza que la aleja de la misma. Por el contrario, si una carga positiva se coloca en el campo eléctrico de una carga negativa, estará sujeta a una fuerza que la hace acercarse

Cuando la distribución de cargas es más compleja se pueden dibujar líneas de fuerza cuyas trayectorias son tangentes a la dirección de la intensidad del campo en cada punto. En general, las líneas del campo eléctrico seguirán trayectorias curvas. En la fig. 17.19 se muestran las líneas de fuerza cuando están presentes una carga positiva y una negativa. Se señala, además, la intensidad del campo resultante en el punto P, dada por la suma vectorial de las intensidades, debidas a la carga positiva ($\vec{E}_2$) y negativa ($\vec{E}_1$).

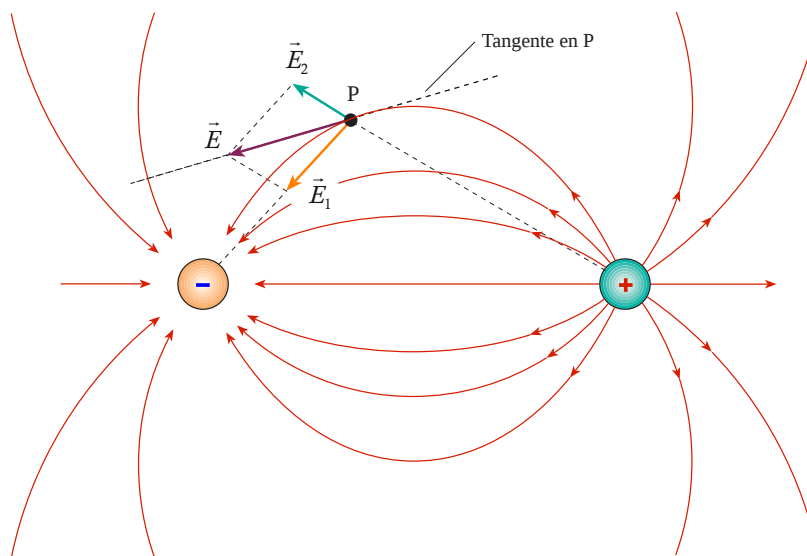


Fig. 17.19 Líneas de fuerza debidas a la presencia de una carga positiva y una negativa. La intensidad de campo resultante en el punto P, es la suma vectorial de las intensidades $\vec{E}_1$, y $\vec{E}_2$. $\vec{E}$ tiene la dirección de la tangente en P.

En el caso de dos cargas positivas, las líneas de fuerza lucen como lo indica la fig 17.20.

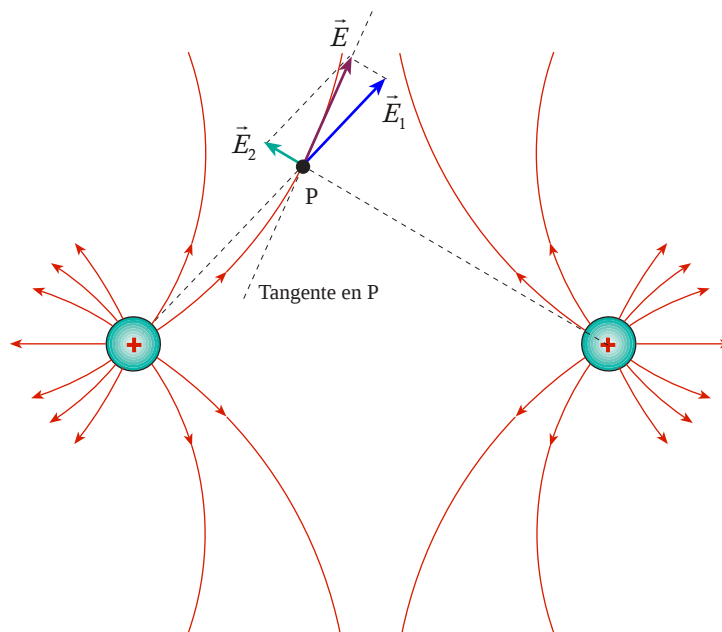


Fig. 17.20 Líneas de fuerzas, debidas a la presencia de dos cargas positivas.

17.9 CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A UNA CARGA PUNTUAL

En la sección anterior vimos que la magnitud de la intensidad del campo eléctrico puede obtenerse dividiendo la magnitud de la fuerza que experimenta una carga de prueba, q_0 , entre el valor de dicha carga. En este caso no se toma en cuenta la distribución de cargas que crea el campo.

En el caso de una carga puntual q que genera un campo eléctrico, la intensidad del campo puede determinarse haciendo uso de la ley de Coulomb. Si alrededor de esa carga puntual se coloca la carga de prueba q_0 , la fuerza que experimenta es:

$$F = k \frac{q \cdot q_0}{r^2} \quad (17.8)$$

Por definición, la magnitud de la intensidad del campo es igual a F/q_0 . De la relación anterior, podemos escribir:

$$E = \frac{F}{q_0} = k \frac{q}{r^2} \quad \Rightarrow \quad E = k \frac{q}{r^2} \quad (17.9)$$

La relación (17.9) expresa la intensidad del campo eléctrico en términos de la carga q que crea el campo y de la distancia r existente entre la carga y el punto donde se desea calcular la intensidad del campo. Como vector, la intensidad de campo tiene un módulo cuyo valor está dado por (17.9) y una *dirección radial* en el caso de una carga puntual. Si la carga puntual es positiva, el campo está dirigido radialmente hacia fuera. Si la carga que crea el campo es negativa, el campo estará dirigido radialmente hacia adentro. Esto, en concordancia con lo mostrado en la fig 17.18. Si el campo es creado por varias cargas, la intensidad resultante será la suma vectorial de las intensidades individuales.

Ejemplo 17.3

Para medir la intensidad del campo eléctrico en el punto P de la fig. 17.21, se colocó allí una carga positiva de valor $q = 20 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ y se determinó que la fuerza resultante sobre la misma era de $4 \cdot 10^{-2} \text{ N}$ y dirigida hacia la derecha. **a)** ¿Cuál es la intensidad del campo en el punto P? **b)** Se retira la carga anterior y en su lugar se coloca una carga negativa de $40 \cdot 10^{-8} \text{ C}$. ¿Cuál es la magnitud y dirección de la fuerza sobre esta carga?

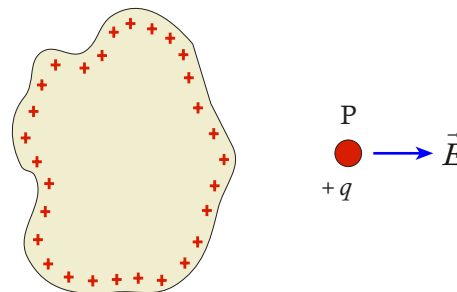


Fig. 17.21 Ejemplo 17.3.

Solución

a) Se tiene:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{4 \cdot 10^{-2}}{20 \cdot 10^{-8}} \frac{\text{N}}{\text{C}} = 2 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

b) El módulo de la fuerza sobre la carga negativa será:

$$F = q \cdot E = 40 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 10^5 = 8 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

Por tratarse de una carga negativa, la fuerza estará dirigida hacia la izquierda.

Ejemplo 17.4

¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico resultante en el punto P de la fig 17.22(a), si $q_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ y $q_2 = -3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$?

Solución

La carga positiva q_1 , origina el campo $\vec{E}_1$, dirigido hacia abajo, mientras que la carga negativa q_2 da lugar al campo $\vec{E}_2$, dirigido hacia la derecha. El campo resultante puede escribirse como:

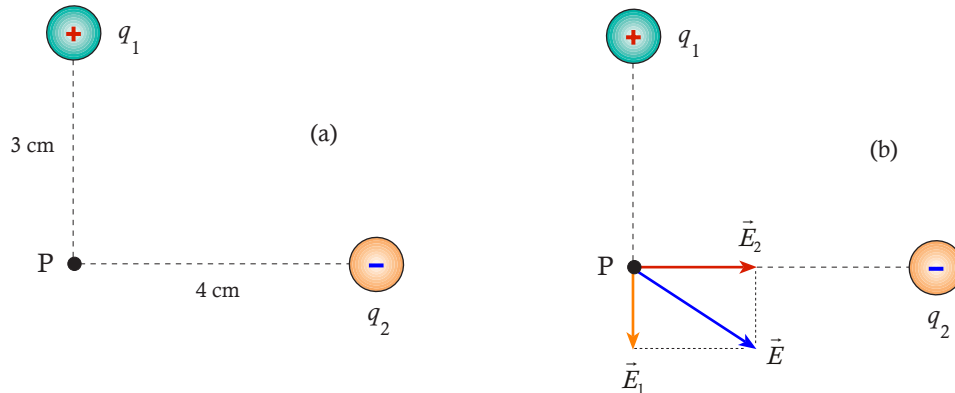


Fig. 17.22 Ejemplo 17.4.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

Dado que $\vec{E}_1$ y $\vec{E}_2$ son perpendiculares entre sí, la magnitud de $\vec{E}$ puede determinarse usando el teorema de Pitágoras, una vez conocidos los valores de E_1 y E_2 :

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 \quad \Rightarrow \quad E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

Los valores de E_1 y E_2 son:

$$E_1 = 9 \cdot 10^9 \frac{2 \cdot 10^{-6}}{(3 \cdot 10^{-2})^2} = \frac{18 \cdot 10^3}{9 \cdot 10^{-4}} = 2 \cdot 10^7 \text{ N/C}$$

$$E_2 = 9 \cdot 10^9 \frac{3 \cdot 10^{-6}}{(4 \cdot 10^{-2})^2} = \frac{27 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^{-4}} = 1,69 \cdot 10^7 \text{ N/C}$$

Entonces:

$$E = \sqrt{(2 \cdot 10^7)^2 + (1,69 \cdot 10^7)^2} = \sqrt{4 \cdot 10^{14} + 2,86 \cdot 10^{14}} = \sqrt{6,86 \cdot 10^{14}} = 2,62 \cdot 10^7 \text{ N/C}$$

17.10 ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA. POTENCIAL ELÉCTRICO.

En el capítulo 11 estudiamos la relación entre trabajo y energía potencial. Se hace un trabajo, cada vez que una fuerza mueve un cuerpo en la dirección de la fuerza. Un objeto adquiere energía potencial gravitacional, en virtud de la posición que alcanza en referencia a un cierto nivel.

La fig. 17.23 ilustra un proceso elemental de conversión de trabajo en energía potencial gravitacional y, posteriormente, en energía cinética.

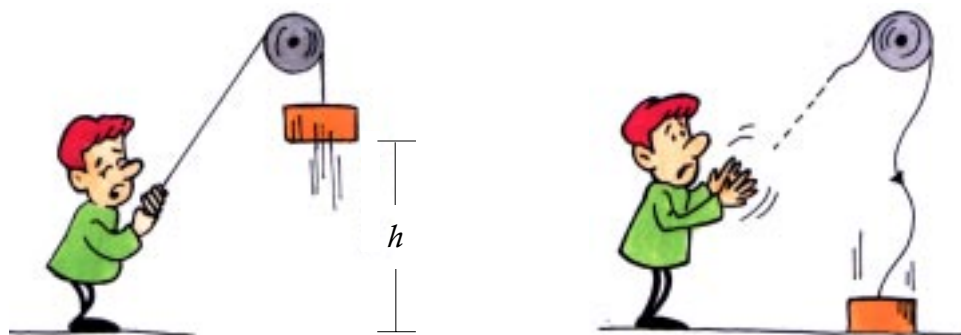


Fig. 17.23 Al elevar el bloque a una altura h , el hombre hace un trabajo en contra de la fuerza de gravedad. De esta forma, el bloque adquiere una energía potencial gravitacional. Al cortar la cuerda, el bloque desciende, convirtiendo su energía potencial en energía cinética.

De una manera similar, un objeto cargado puede adquirir o tener una energía potencial en virtud de su ubicación dentro de un campo eléctrico. Consideremos una esfera con carga positiva, fig. 17.24.

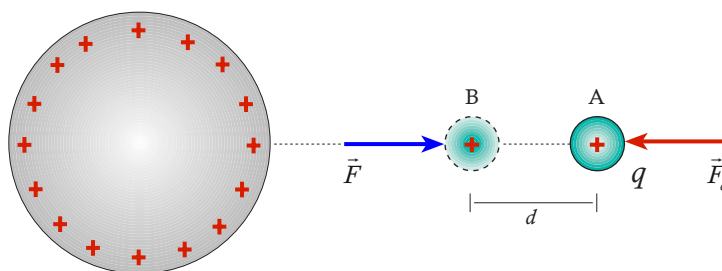


Fig. 17.24 La fuerza $\vec{F}_a$ debe realizar un trabajo en contra de la fuerza $\vec{F}$ del campo creado por la esfera, para poder mover la carga q hacia la izquierda.

Por tratarse de dos cargas positivas, se produce una fuerza de repulsión entre la esfera y la carga q . Si la esfera se mantuviera inmóvil en el espacio, la carga q se desplazaría hacia la derecha, por efecto de la fuerza F ejercida por el campo eléctrico sobre la misma. Se dice entonces, que q posee *energía potencial eléctrica*, por estar ubicada dentro del campo eléctrico de la esfera. Si, por algún medio, tratáramos de acercar la carga a la esfera, tendríamos que realizar cierto trabajo para superar la fuerza de repulsión sobre q . Este trabajo es igual a la energía ganada por la carga. Si, después de trasladada, se soltase la carga, ésta aceleraría hacia la derecha y su energía potencial se transformaría en energía cinética.

El trabajo realizado por la fuerza $\vec{F}_a$ para trasladar la carga q desde A hasta B para cubrir la distancia d , está dado por:

$$W_{AB} = F_a \cdot d \quad (17.10)$$

La fuerza aplicada debe ser igual y de dirección contraria a la fuerza del campo eléctrico

Esto garantiza que no hay aceleración, de manera que no se modifique la energía cinética de la carga y, por tanto, que el cambio tenga lugar sólo en la energía potencial. De acuerdo a esto, podemos escribir:

$$F_a = -F_{\text{Eléctrica}} = -F \quad (17.11)$$

Como $F = q \cdot E$, podemos combinar (17.9 y 17.10)

$$W_{AB} = -qEd \quad (17.12)$$

El cambio de energía potencial eléctrica desde A hasta B, tiene que ser una cantidad positiva, ya que la carga incrementa su potencial. Entonces:

$$\Delta U_{AB} = U_B - U_A = -W_{AB} = -(-qEd)$$

$$\Delta U_{AB} = qEd \quad (17.13)$$

Las relaciones (17.12) y (17.13) indican que tanto el trabajo para mover una carga en un campo eléctrico como la variación de energía potencial eléctrica, son proporcionales a la carga q . Entonces, si la carga se duplica, W_{AB} y ΔU_{AB} se duplican. Evidentemente, si dividimos (17.13) por q , obtenemos una cantidad $\Delta U_{AB}/q$ que no es función de la carga y que depende, únicamente, del campo eléctrico y de la distancia recorrida al trasladar dicha carga. A la cantidad $\Delta U_{AB}/q$ se le denomina *diferencia de potencial eléctrico* entre los puntos A y B y se le denota por V_{AB} :

$$V_{AB} = \frac{\Delta U_{AB}}{q} = V_B - V_A \quad (17.14)$$

De acuerdo a la discusión anterior, podemos escribir:

La diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos A y B, situados dentro de una región donde existe un campo eléctrico, es igual al cambio de energía potencial electrostática que experimenta una carga, dividida por el valor de la misma.

En el sistema SI y, de acuerdo a (17.14), la unidad de potencial eléctrico es el Joule/Coulomb, unidad a la que se denomina voltio y se abrevia con la letra V. Entonces:

$$1 \text{ voltio} = \frac{1 \text{ Joule}}{1 \text{ Coulomb}} \quad \Rightarrow \quad 1 \text{ V} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}}$$

Es importante mencionar que, mientras el campo eléctrico es una cantidad vectorial ($\vec{E} = \vec{F} / q$), la diferencia de potencial es una cantidad escalar.

Usualmente, a la diferencia de potencial se le conoce como *voltaje* o *tensión eléctrica*, designación que es ampliamente empleada para especificar equipos y artefactos eléctricos utilizados en el hogar. Así, televisores, neveras, lámparas, microondas y una gama muy amplia de equipos, funcionan con 110 voltios, en tanto que las baterías de los automóviles poseen una diferencia de potencial, entre sus bornes, de 12 voltios.

17.11 CORRIENTE ELÉCTRICA. LEY DE OHM.

Una corriente eléctrica es un flujo de cargas eléctricas. Aunque es usual relacionar la corriente eléctrica con los materiales conductores, la misma tiene lugar, en mayor o menor medida, en diversos medios. Consideremos el conductor mostrado en la fig. 17.25. Si medimos la cantidad de carga Δq , que pasa a través de un área A , en un intervalo de tiempo Δt , y establecemos la relación $\Delta q / \Delta t$, obtenemos lo que se conoce como *intensidad de corriente eléctrica*, I :

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (17.15)$$

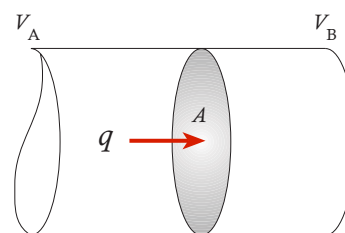


Fig. 17.25 La intensidad de la corriente eléctrica se define en términos de la cantidad de carga que atraviesa un área A , en un tiempo dado.

Como Δq está dado en Coulombs (C) y Δt en segundos (s) la intensidad de corriente se expresa en coulombs/segundos (C/s). A esta última unidad se le denomina amperio (A):

$$1 \text{ Amperio} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ segundo}} \Rightarrow 1 \text{ A} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}}$$

A menudo, a la intensidad de corriente eléctrica se le denomina, simplemente, *corriente eléctrica*. Hay que destacar que el flujo de cargas sólo puede producirse ante la presencia de un campo eléctrico, capaz de aplicar la fuerza necesaria a las cargas y de crear una diferencia de potencial entre dos puntos del conductor. A medida que esa diferencia de potencial se incrementa, también aumenta el flujo de cargas para un mismo conductor. Por otra parte, si se utilizan conductores de distintas naturaleza, mientras se mantiene una misma diferencia de potencial, la intensidad de la corriente varía. Esta última condición se expresa en los conductores y en muchos materiales, mediante una relación lineal, conocida como *ley de Ohm*, que establece lo siguiente:

La diferencia de potencial entre dos puntos de un conductor es proporcional a la corriente que circula por el mismo.

La ley de Ohm se expresa mediante la siguiente relación:

$$V = RI \quad (17.16)$$

Donde V es la diferencia de potencial, I es la corriente y R es una característica del conductor, conocida como *resistencia*, cuya unidad fundamental es el *ohmio*, que se simboliza por la letra griega Ω . La relación (17.15) es lineal para una amplia gama de materiales y su gráfica es una línea recta que pasa por el origen, tal como se muestra en la fig. 17.26. La pendiente de la recta, $\Delta V/\Delta I$, corresponde al valor de la resistencia:

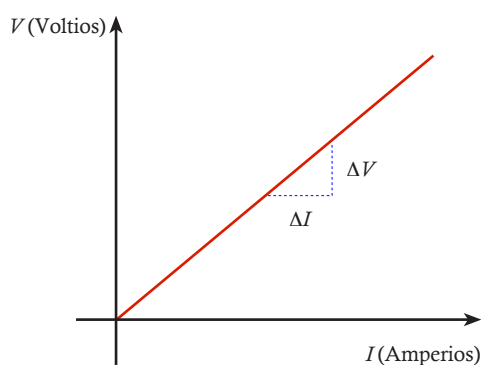


Fig. 17.26 Relación V - I para un material resistivo.

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (\text{Pendiente de la recta}) \quad (17.17)$$

A los materiales que cumplen con la ley de Ohm, se les conoce como *materiales resistivos*. En general, podemos hablar de la resistencia como una propiedad de los conductores que permite, en mayor o menor grado, el flujo de corriente. En un conductor cilíndrico, su valor depende de la longitud del conductor (L), de su área transversal y de su naturaleza. Esta última dependencia se expresa mediante una propiedad del conductor denominada *resistividad* (ρ). Lo anterior, puede ser expresado como:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (17.18)$$

Donde L , A y ρ están dados en metros (m), metros cuadrados y ohmios-m, respectivamente. En la tabla se muestran las resistividades de algunos materiales conductores:

Material	Resistividad (Ω -m)
Cobre	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Aluminio	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Hierro	$10 \cdot 10^{-8}$

Tabla 17.1 Resistividad de algunos materiales conductores.

Ejemplo 17.5

El diámetro de un conductor de cobre, calibre 10, es de 2,59 mm. **a)** Determina la resistencia de un alambre de cobre de 1 km de longitud. **b)** Si en los extremos del alambre se aplica una diferencia de potencial de 110 voltios, determina la corriente que fluye en el mismo.

Solución

a) De acuerdo a la tabla 17.1, $\rho_{Cu} = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega - m$. El área del conductor es:

$$A = \pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (2,59 \cdot 10^{-3})^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 6,71 \cdot 10^{-6}}{4} = 5,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Por tanto:

$$R = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega - m \cdot \frac{1.000 \text{ m}}{5,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = \frac{1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 10^3}{5,27 \cdot 10^{-6}} \Omega = 3,23 \Omega$$

b) De acuerdo con (17.16):

$$I = \frac{V}{R} = \frac{110 \text{ V}}{3,23 \Omega} = 34,10 \text{ A}$$

17.12 CIRCUITOS ELÉCTRICOS. COMBINACIÓN DE RESISTENCIAS.

Un circuito eléctrico es una agrupación de elementos eléctricos, conectados convenientemente para producir voltajes y corrientes en las diversas partes que lo integran. Entre los elementos de un circuito están:

Fuentes de energía: también conocidas como fuentes de alimentación, generadores de energía, o fuentes de voltaje, tienen como papel fundamental mantener una diferencia de potencial (o un campo eléctrico) entre dos puntos del circuito. A las fuentes de energía se les conoce como elementos activos de los circuitos. Como ejemplo de ellas podemos citar las baterías, las pilas y los grandes generadores utilizados para suministrar energía a los centros poblados. A las fuentes de energía se les representa, mediante los símbolos mostrados en la fig. 17.27.

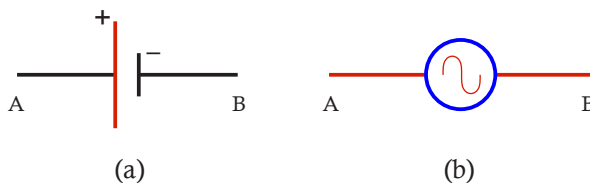


Fig. 17.27 Fuentes de energía: a) Continua. b) Alterna.

En una fuente de energía o de corriente continua, como la de la fig. 17.27(a), las cargas fluyen siempre en una sola dirección; por ejemplo, desde B hasta A. En una fuente de corriente alterna, las cargas fluyen durante un tiempo en una dirección, digamos desde B hasta A y, luego, lo hacen en dirección contraria, desde A hasta B.

Elementos pasivos: las fuentes de energía pueden conectarse a componentes que disipan o que almacenan la energía de las mismas. Las resistencias disipan la energía en forma de calor, mientras que los condensadores y los inductores la almacenan. A esos componentes se les denominan *elementos pasivos*. A las resistencias, condensadores e inductores se les representa mediante los símbolos indicados en la fig. 17.28.

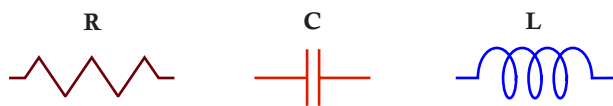


Fig. 17.28 Símbolos usados para representar una resistencia, un condensador y un inductor.

En este texto nos limitaremos al estudio de circuitos que sólo contienen fuentes de energía continua y resistencias, como elementos pasivos. El circuito más elemental podemos obtenerlo al conectar una resistencia a una fuente de corriente continua, tal como se muestra en la fig. 17.29. Los conductores que conectan la batería a la resistencia R se suponen ideales, por lo que no poseen resistencia. De acuerdo con esto, el voltaje de la fuente aparece entre los terminales de la resistencia R . Según la ley de Ohm, la corriente I está dada por:

$$I = \frac{V}{R}$$

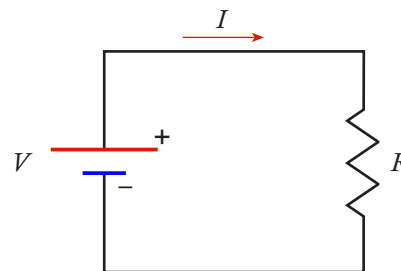


Fig. 17.29 Circuito elemental de corriente continua.

Es importante notar que a cualquier corriente I se le asigna una dirección de flujo en un circuito. Esta dirección es señalada por la flecha en la fig. 17.29. Esto indicaría que las cargas se mueven según esa dirección. En realidad, los electrones se mueven en dirección contraria a la de la flecha. Sin embargo, por convención se acepta que el flujo de corriente corresponde a cargas positivas y, por tanto, la dirección convencional de la corriente es opuesta a la del flujo de electrones.

En un circuito eléctrico pueden encontrarse varias resistencias, conectadas de diversas maneras. Las asociaciones más comunes corresponden a *resistencias conectadas en serie* y *resistencias conectadas en paralelo*.

Resistencias conectadas en serie: dos o más resistencias están asociadas en serie, si se conectan en la forma mostrada en la fig. 17.30. El voltaje aplicado, V_{AB} , se reparte entre todas las resistencias, de manera que podemos escribir:

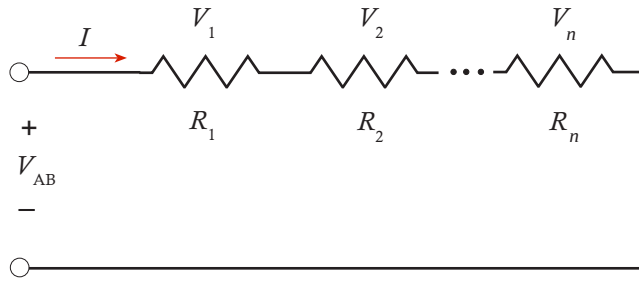


Fig. 17.30 Resistencias en serie.

$$V_{AB} = V_1 + V_2 + \cdots + V_n \quad (17.19)$$

Como en cada resistencia se cumple la ley de Ohm y *la corriente es la misma en todo el circuito*, se tiene:

$$V_1 = R_1 I \quad V_2 = R_2 I \quad \cdots \quad V_n = R_n I$$

$$V_{AB} = R_1 I + R_2 I + \cdots + R_n I = (R_1 + R_2 + \cdots + R_n) I \quad (17.20)$$

Si hacemos $R_1 + R_2 + \cdots + R_n = R_{\text{Serie}}$, podemos escribir:

$$V_{AB} = R_{\text{Serie}} I \quad (17.21)$$

Lo anterior indica que varias resistencias en serie pueden substituirse por una sola resistencia, equivalente a la suma de todas las resistencias individuales.

Resistencias conectadas en paralelo: dos o más resistencias están asociadas en paralelo si se conectan de la forma mostrada en la fig. 17.31. *En esta configuración, el voltaje es el mismo en todas las resistencias, mientras que la corriente total, I , se reparte entre las mismas.* De acuerdo a esto:

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n \quad (17.22)$$

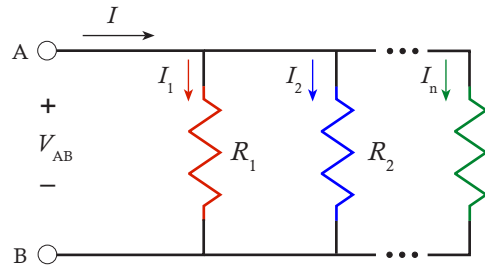


Fig. 17.31 Resistencias conectadas en paralelo.

Usando la ley de Ohm en cada resistencia:

$$I = \frac{V_{AB}}{R_1} + \frac{V_{AB}}{R_2} + \cdots + \frac{V_{AB}}{R_n} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \right) V_{AB} \quad (17.23)$$

Si hacemos $I = V_{AB} / R_{\text{Paralelo}}$,

$$I = \frac{V_{AB}}{R_{\text{Paralelo}}} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \right) V_{AB} \quad (17.24)$$

Se deduce entonces que:

$$\frac{1}{R_{\text{Paralelo}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (17.25)$$

Relación que indica lo siguiente: cuando varias resistencias están conectadas en paralelo el recíproco de la resistencia equivalente es igual a la suma de los recíprocos de las resistencias individuales.

Ejemplo 17.6

Para el circuito mostrado en la fig 17.32 determina: **a)** La resistencia total entre los bornes de la batería. **b)** La corriente I_1 suministrada por la batería. **c)** Los voltajes en cada resistencia. **d)** Las corrientes I_1 , I_2 , I_3 , en cada resistencia.

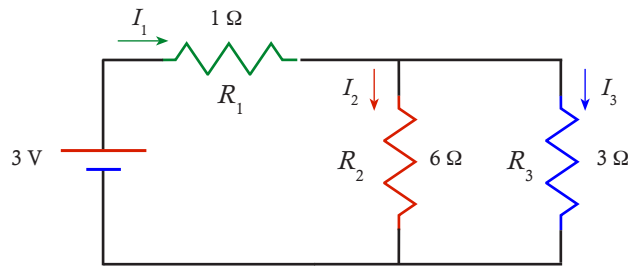


Fig. 17.32 Circuito para el ejemplo 17.6.

Solución

a) Las resistencias R_2 y R_3 están en paralelo. Si llamamos R_{23} a la resistencia equivalente de la combinación de R_2 con R_3 , tenemos:

$$\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Rightarrow \frac{1}{R_{23}} = \frac{R_2 + R_3}{R_2 R_3} \Rightarrow R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

Sustituyendo valores:

$$R_{23} = \frac{6 \cdot 3}{6 + 3} = \frac{18}{9} = 2 \, \Omega$$

En la fig. 17.33(a) se muestra el circuito resultante. Las resistencias R_1 y R_{23} están en serie y podemos escribir:

$$R_T = R_1 + R_{23} = 1 \, \Omega + 2 \, \Omega = 3 \, \Omega$$

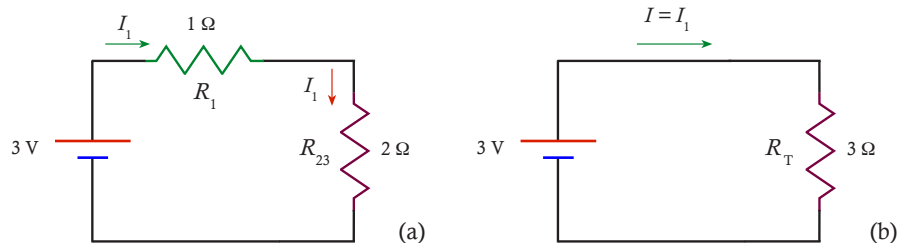


Fig. 17.33 Reducciones del circuito de la fig. 17.32.

De acuerdo a lo anterior, podemos dibujar el circuito de la fig. 17.33(b).

b) La corriente suministrada por la batería es:

$$I = \frac{3 \text{ V}}{3 \text{ } \Omega} = 1 \text{ A}$$

Esta corriente es la misma que pasa por la resistencia R_1 y la resistencia equivalente R_{23} :

$$I_1 = \frac{3 \text{ V}}{3 \text{ } \Omega} = 1 \text{ A}$$

c) De acuerdo con la fig. 17.33(a), los voltajes en las resistencias R_1 y R_{23} son:

$$V_1 = R_1 I_1 = 1 \text{ } \Omega \cdot 1 \text{ A} = 1 \text{ V} \quad V_{23} = R_{23} I_1 = 2 \text{ } \Omega \cdot 1 \text{ A} = 2 \text{ V}$$

Como R_{23} es la combinación en paralelo de R_2 y R_3 , los voltajes en R_2 y R_3 son iguales a V_{23} :

$$V_2 = 2 \text{ V} \quad V_3 = 2 \text{ V}$$

d) La corriente en R_1 es $I = 1 \text{ A}$. De la fig. 17.33 podemos calcular las corrientes en R_2 y R_3 :

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{2 \text{ V}}{6 \text{ } \Omega} = \frac{1}{3} \text{ A} \quad I_3 = \frac{V_3}{R_3} = \frac{2 \text{ V}}{3 \text{ } \Omega} = \frac{2}{3} \text{ A}$$



PIENSA Y EXPLICA



17.31 ¿Qué es un campo eléctrico?

17.32 Define intensidad del campo eléctrico. Escribe la relación matemática que la describe.

17.33 ¿Qué significado tienen las líneas del campo eléctrico?

17.34 Explica por qué las líneas de fuerza de las figuras 17.18 , 17.19 y 17.20 tienen las direcciones mostradas.

- 17.35** A partir de la ley de Coulomb, determina el campo eléctrico debido a una carga puntual.
- 17.36** Define energía potencial eléctrica
- 17.37** Define diferencia de potencial eléctrico.
- 17.38** ¿Qué es corriente eléctrica? ¿Qué es intensidad de corriente eléctrica?
- 17.39** ¿Qué establece la ley de Ohm? ¿Qué son materiales resistivos?
- 17.40** ¿Qué es resistencia eléctrica? ¿Qué es la resistividad?
- 17.41** ¿Cuáles son los elementos básicos de un circuito eléctrico?
- 17.42** ¿Cuándo varias resistencias están en serie? ¿Cuándo están en paralelo?
- 17.43** Si la corriente en dos resistencias de un circuito es la misma, ¿están necesariamente en serie?



PROBLEMAS



- 17.6** El campo eléctrico en una región del espacio es $E = 5 \cdot 10^4 \text{ N/C}$ ¿Cuál es la fuerza sobre un electrón colocado bajo la acción de este campo?
- 17.7** Una carga positiva q_1 , se coloca en el origen del eje X y otra carga positiva q_2 está en el eje X en el punto $x = a$. Determina el campo eléctrico cuando: **a)** $x > a$. **b)** $0 < x < a$. **c)** $x < 0$.
- 17.8** Una carga puntual de $10 \text{ } \mu\text{C}$ está en el origen. ¿Cuál es el valor y la dirección del campo eléctrico en $x = 8 \text{ m}$?
- 17.9** Dos cargas puntuales de $5 \text{ } \mu\text{C}$ descansan sobre el eje X, una en el origen y la otra en $x = 10 \text{ m}$. **a)** Determina el campo eléctrico en $x = 12 \text{ m}$. **b)** ¿Dónde es nulo el campo eléctrico sobre el eje X?

17.10 Determina el valor de la corriente y del voltaje en cada resistencia de los circuitos de la fig. 17.34

17.11 ¿Cuál es la resistencia equi valente entre los terminales A y B de los circuitos de la fig. 17.35.

17.12 Determina las corrientes y los voltajes en las resistencias de la fig. 17.36.

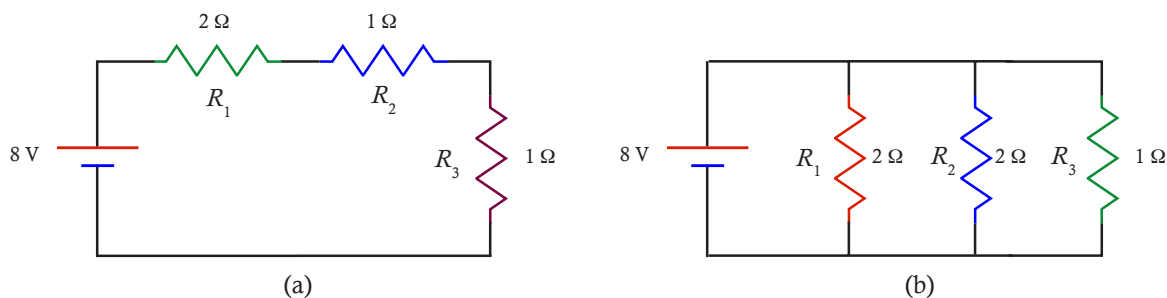


Fig. 17.34 Circuitos para el problema 17.10.

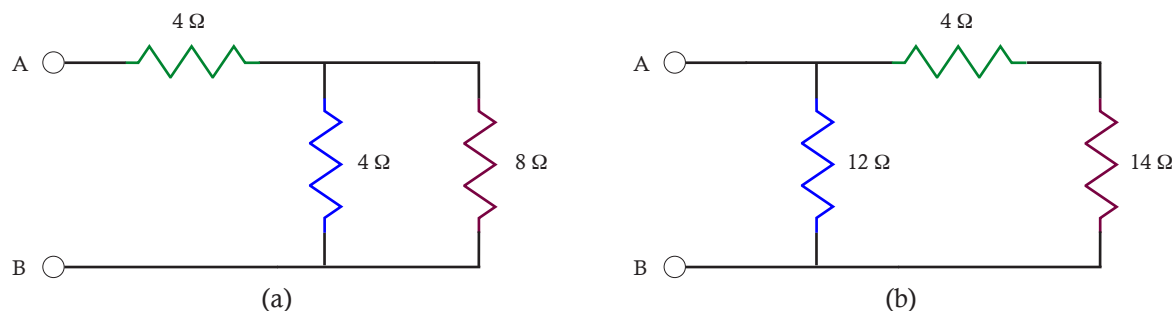


Fig. 17.35 Problema 17.11.

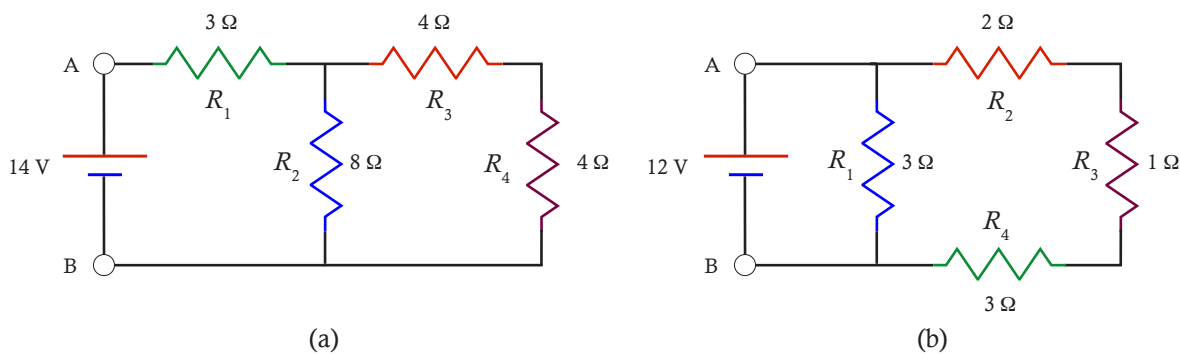
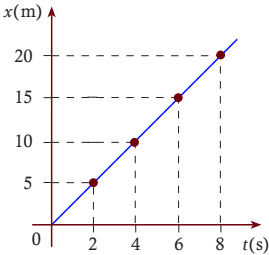
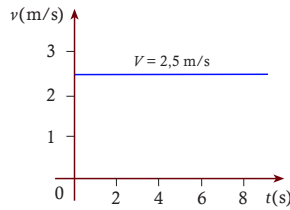


Fig. 17.36 Problema 17.12.

RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS

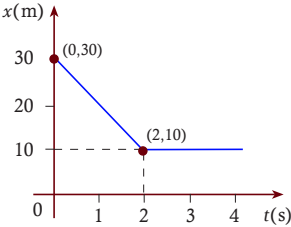
- 2.1 a) 0,0105 km b) 46,7 mm c) 28.300 g d) 30 min e) 0,045 s f) $300 \cdot 10^{-6}$ min
- 2.2 a) 2.400.000 Ω b) 0,00000001 A c) $22 \cdot 10^{-6}$ μ f d) 857 Hz
- e) 12.000.000.000 bytes f) 0,094 V
- 3.1 $d = 59,26$ km 3.2 $V_m = 68,38$ km/h $t = 28$ min 3.3 Se mueven con igual rapidez.
- 3.4 Se mide la distancia recorrida y el resultado se divide entre el tiempo marcado por el cronómetro.
- 3.5 680 m 3.6 0,14 s 3.7 3,4 km 3.8 $\vec{v}_2 = 5\vec{i}$ $\vec{v}_2 = -3\vec{i}$ $\vec{v}_3 = -4\vec{i}$
- 3.9 a) $\vec{v} = 8\vec{i}$ m/s b) $\vec{v} = -5\vec{i}$ km/h c) $\vec{v} = 40\vec{j}$ m/s d) $\vec{v} = -10\vec{j}$ cm/min
- 3.10 a) 1.002 m, $106\vec{i}$ b) $V_m = 167$ m/min c) $V_m = 167$ m/min, $\vec{V}_{AB} = 17,67\vec{i}$ m/min
- 3.11 4,47 m 3.12 a) El maratonista A. b) No lo alcanza. 3.13 $V_m = 2,26$ m/s $\vec{V}_m = 0$ m/s
- 3.14 1.800 vehículos 3.15 4 min 3.16 66,67 m

- 4.1 a)  b) 5 m, 15 m c) 8 s

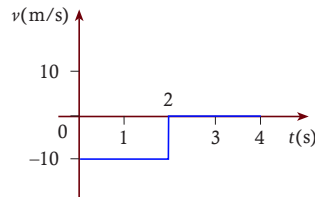


- 4.2 a) El móvil está alejado 10 m del origen, al comenzar la medición. b) $V = 5$ m/s c) 30 m

- d) $30\vec{i}$ m e) Se aleja. f) $\frac{\Delta x}{\Delta t} = 5$ m/s

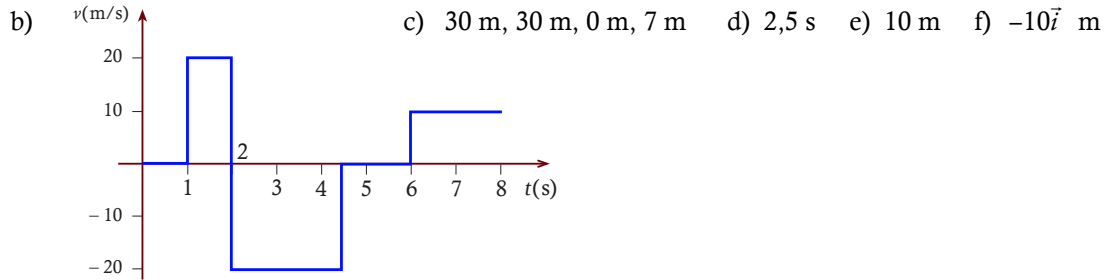
- 4.3 a) 30 m b)  c) Se acerca

- d) $\frac{\Delta x}{\Delta t} = -10$ m/s



- e) El móvil se acerca al origen. f) 2 h g) 20 m h) $-20\vec{i}$ m

- 4.4 a) Segmento AB: móvil detenido por 1 s. Segmento BC: móvil se aleja del origen en. Segmento CD: móvil se devuelve y se acerca al origen. Segmento DE: móvil se detiene por 1,5 h. Segmento EF: móvil se aleja del origen.



5.1 $a = 10 \frac{\text{km/h}}{\text{s}}$

5.2 5 km/h

5.3 Intervalo AB: $a = 3 \frac{\text{km/h}}{\text{s}}$

Intervalo BC: $a = 0$

Intervalo CD: $a = 0,67 \frac{\text{km/h}}{\text{s}}$

5.4 250 m

5.5 $v_f = 32 \text{ m/s}$

5.6 $a = -3,85 \text{ m/s}^2$

5.7 $a = 1,5 \text{ m/s}^2$, $x = 33 \text{ m}$

5.8 $17,78 \text{ m/s}^2$

5.9 a) 3,06 s b) 17,81 m c) $v_{\text{guepardo}} = 21,42 \text{ m/s}$, $v_{\text{gacela}} = 11,63 \text{ m/s}$

5.10 a) $2,78 \text{ m/s}^2$ b) $\vec{V}_m = 50\vec{i} \text{ km/h}$

5.11 5 s

5.12 a) 90 m b) 30 m/s

5.13 a) 2,78 s b) 30,86 m

5.14 $a = -4,26 \text{ m/s}^2$, $x = 562,32 \text{ m}$

5.15 277,60 m

5.16 a) 45,1 m b) 76,6 m

5.17 $-5,30 \text{ m/s}^2$

5.18 7,64 s

5.19 a) 8,16 s c) $v_{\text{auto}} = 16,32 \text{ m/s}$, $v_{\text{bus}} = 9,79 \text{ m/s}$ c) 26,66 m

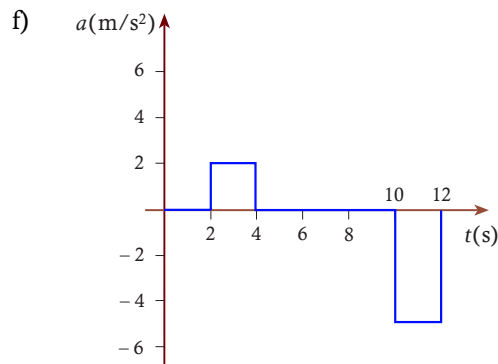
5.20 a) Movimiento acelerado: $2 \leq t < 6$. Movimiento retardado: $10 \leq t < 12$

b) Movimiento uniforme: $0 \leq t < 2$; $6 \leq t < 10$

c) $0 \leq t < 2$: $a = 0$; $2 \leq t < 6$: $a = 2 \text{ m/s}^2$; $6 \leq t < 10$: $a = 0$; $10 \leq t < 12$: $a = -5 \text{ m/s}^2$

d) 28 m

e) 78 m



5.21 2,86 s; 28 m/s

5.22 $6,94 \text{ m/s}^2$

5.23 a) 15,34 m/s b) 1,56 s c) $9,8 \text{ m/s}^2$ d) 6,86 m/s

5.24 a) 7,42 m/s b) 7,42 m

5.25 0,36 s; 16,5 cm

5.26 a) 27,6 m b) 23,6 m/s; $9,8 \text{ m/s}^2$

5.27 19,80 m/s

5.28 a) 19,6 m/s b) 19,6 m

5.29 4,22 m/s

5.30 a) 4,08 s b) 4,81 m/s

5.31 3,52 s

5.32 a) 3,35 s b) 32,83 m/s

7.1 a) 10 m/s^2 b) 8 m/s^2 c) $6,32 \text{ m/s}$; $5,66 \text{ m/s}$

7.2 19,6 N

7.3 a) 0 b) 10 N

- 7.4 4,24 m/s 7.5 1.470 N 7.6 7,6 m/s² 7.7 0 7.8 6,03 m/s²; 301,5 m
- 7.9 a) 50 N b) 100 N c) 156,8 N 7.10 2.500 N
- 9.1 Si 9.2 $x_{CM} = 0,8$ m 9.3 $x_{CM} = 0,0467 \cdot 10^8$ m del centro de la Tierra. 9.4 $x_{CM} = 1,6$ m
- 9.5 $x_{CM} = 0$; $y_{CM} = 6,10$ m (Referidos al centro y a la base del poste, respectivamente)
- 9.6 $x_{CM} = 0$; $x_{CM} = 5,16$ m (Referidos al eje y base de la columna, respectivamente)
- 9.7 $x_{CM} = -13,75$ cm; $y_{CM} = 3,68$ m
- 10.1 $\tau_{100} = 0,15$ N m; $\tau_{75} = -0,11$ N m. La balanza se inclina hacia la masa de 100 g.
- 10.2 $P_{Alcides} = 317,62$ N 10.3 Luis 10.4 34 cm 10.5 $P_{regla} = 0,98$ N
- 10.6 a) $\vec{F}_R = 650\vec{i}$ N b) $\vec{F}_R = 150\vec{i}$ N 10.7 a) $\vec{F}_R = 0,04\vec{i}$ N b) $\vec{F}_R = 0,04\vec{i}$ N
- 10.8 a) 980 N b) No varía 10.9 311,6 N 10.10 294,28 N; 0 10.11 4.001,62 N
- 10.12 786 N; 2,4 m 10.13 a) $x = 49$ (Lado izquierdo del pivote) b) 3,43 N
- 10.14 1,31 m de las ruedas traseras. 10.15 1,07 m 10.16 A 1 m de Sergio 10.17 20 kg m
- 11.1 $E_p = 156,8$ J $E_c = 55,78$ J
- 11.2 $T_D = 35$ N (Hacia la derecha); $T_I = 35$ N (Hacia la izquierda); $T_{Neto} = 0$
- 11.3 a) 0 b) 98 J c) 98 J 11.4 0,8 J; en calor 11.5 a) 15.680 J b) 15.680 J c) 15.680 J
d) 15.680 J e) $K = 7.840$ J, $U = 7.840$ J
- 12.1 $T_F = 212$ °F; $T_K = 373,15$ K 12.2 Sí tiene fiebre 12.3 $T_F = 3.227$ °F; $T_K = 2.048,15$ K
- 12.4 -20 °F 12.6 $T_h = -45$ °C 12.7 1,8 mm 12.8 0,015 m² 12.9 142,65 °C
- 12.10 No se agrieta 12.11 $3\alpha = 4,7 \cdot 10^{-8} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ 12.12 100 Kcal 12.13 192,5 Kcal; 220 Kcal
- 12.14 8,25 Kcal 12.15 a) $T_i = 252,27$ °C b) 1,0054 m c) 1 kg 12.16 No
- 12.17 29 °C 12.18 90,9 kg
- 13.1 C, A 13.2 DA, FG, AE 13.3 $\lambda = 0,86$ cm 13.4 $\lambda_1 = 3,37$ m; $\lambda_2 = 200$ m
- 13.7 $\lambda = 57,17$ cm 13.8 2,92 s 13.9 $f = 0,1$ Hz; $v = 0,6$ m/s
- 14.1 $\frac{I_2}{I_1} = 10.000$ 14.2 Al doble de la distancia de la fuente de sonido. 14.3 100 db, 30 db
- 14.4 10^{-8} W/m² 14.5 a) $I_2 = 9I_1$ b) 25,95 m 14.6 La señal es 10^6 veces mayor que el ruido
- 14.7 8 m y 80 m 14.8 $I = 0,0057$ W/m² 14.9 104,34 m 14.10 $\lambda_m = 0,45$ mm $\lambda_H = 1,36$ mm
- 14.11 4,94 MHz 14.12 2.256,92 m

- 15.1** a) 50° con relación a la normal b) 15° con relación a la normal. c) Paralelo al espejo E_2
15.2 $9,4 \cdot 10^{12}$ km **15.3** a) $5,09 \cdot 10^{14}$ Hz b) $\lambda = 442$ mm **15.4** $n = 1,46$
15.5 $v_{\text{Benceno}} = 2 \cdot 10^8$ m/s; $v_{\text{Hielo}} = 2,29 \cdot 10^8$ m/s **15.6** 54 cm
16.1 a) 30 cm b) $h = 12$ cm, $A = 1$ **16.2** a) 5 m b) 0,4 m/s
16.4 40° con respecto a la normal de la nueva posición del espejo.
16.9 La imagen es virtual, derecha y de menor tamaño que el objeto.
16.10 a) Imagen real, invertida y de menor tamaño. b) Imagen real, invertida y de igual tamaño.
 c) No se forma imagen
16.11 a) $d_i = -6,67$ cm; $M = 0,33$ **16.12** a) $d_i = -12$ cm b) $M = 0,4$ c) La imagen es derecha
16.13 a) $d_o = 25$ cm **16.14** $d_i = -11,54$ cm; $h_i = 1,16$ m
16.15 Imagen virtual correspondiente a un punto en el foco del espejo.
16.16 Imagen ubicada a 33,33 cm, real, invertida y altura igual a 16,67 cm.
17.1 $n = 75 \cdot 10^8$ electrones **17.2** $F = 23,04 \cdot 10^{-9}$ N **17.3** $\vec{F}_{R(q_2)} = 2,16\vec{i}$ N; $\vec{F}_{R(q_3)} = -3,67\vec{i}$ N
17.4 $q_2 = 11,11 \cdot 10^{-7}$ C **17.5** A 12,43 cm de q_1 **17.6** $F = 8 \cdot 10^{-15}$ N
17.7 a) $\vec{E} = k(\frac{q_1}{(x+a)^2} + \frac{q_2}{x^2})\vec{i}$ b) $\vec{E} = k(\frac{q_1}{x^2} - \frac{q_2}{(a-x)^2})\vec{i}$ c) $\vec{E} = -k(\frac{q_1}{x^2} - \frac{q_2}{(a+x)^2})\vec{i}$
17.8 $\vec{E} = 1.400\vec{i}$ N/C **17.9** a) $\vec{E} = 11.562,5\vec{i}$ N/C b) 5 m **17.10** a) $I_1 = I_2 = I_3 = 2$ A; $V_1 = 4$ V,
 $V_2 = 2$ V, $V_3 = 2$ V b) $V_1 = V_2 = V_3 = 8$ V; $I_1 = 4$ A, $I_2 = 4$ A, $I_3 = 8$ A
17.11 a) $R = 6,67 \Omega$ b) $R = 7,2 \Omega$
17.12 a) $I_1 = 2$ A $I_2 = 1$ A $I_3 = 1$ A $I_4 = 1$ A
 $V_1 = 6$ V $V_2 = 8$ V $V_3 = 4$ V $V_4 = 4$ V
 b) $I_1 = 4$ A, $I_2 = 2$ A, $I_3 = 2$ A, $I_4 = 2$ A; $V_1 = 12$ V, $V_2 = 4$ V, $V_3 = 2$ V, $V_4 = 6$ V

Índice Analítico

A

Aceleración
 de gravedad 91
 definición de 69
 instantánea 71
 media 72
 relación con la fuerza y con la masa 119
 y fuerza neta 120
 Aceleración de gravedad
 valor de la 91
 Acelerado
 movimiento 70
 movimiento uniformemente
 fórmula del 75
 Actitud de un científico 7
 Aislantes 351
 Altura máxima
 en caída libre 100
 Amperio
 como unidad SI de corriente eléctrica 370
 Amplificación de espejos esféricos 330
 Amplitud de una onda 258
 Ángulo de incidencia 270
 Ángulo de incidencia de la luz 310
 Ángulo de reflexión 270
 Ángulo de reflexión de la luz 310
 Ángulo de refracción 311
 Antinodos 275
 Átomos 346

B

Batidos en una onda de sonido 294
 Brazo de una fuerza 167

C

Caída libre 91, 92, 93
 experimento de Galileo 92
 fórmulas del movimiento en 93, 94
 lanzamiento vertical hacia abajo 98
 lanzamiento vertical hacia arriba 100
 sin velocidad inicial 93
 tiempo máximo en 100
 Calor y temperatura 13
 Calórica

 energía 200
 Campo eléctrico 362
 de una carga puntual 365
 Carga del electrón 350
 Carga eléctrica 348
 Carga neta 351
 Centro de gravedad 150
 de un objeto de forma irregular 153
 de un objeto simétrico 153
 determinación del 153
 fuera del objeto material 153
 Centro de masa 148, 149
 de masas colocadas en línea recta 155
 de masas distribuidas en el plano XY 158
 de masas situadas sobre el eje Y 158
 determinación analítica del 155
 vs centro de gravedad 150, 151, 152, 153
 Ciencia y religión 9
 Ciencia y tecnología 8
 Cinética
 energía 200, 201, 202
 Circuitos eléctricos 372
 Composición de fuerzas 171
 Conducta del científico 6
 Conductores 351
 Conservación de la energía 201
 Convergentes
 lentes 337
 Conversión de energía 201
 Corriente eléctrica 370
 Coulomb
 ley de 355
 unidad de carga eléctrica 350
 Cuantización de la carga 350
 Cuantos 305

D

Decibel
 definición del 284
 Defectos visuales 344
 Desaceleración 70
 Desacelerado
 movimiento 70
 movimiento uniformemente
 fórmula del 75

Descomposición de fuerzas 171
Desplazamiento
 en un movimiento 42
Diagrama de cuerpo libre 113
Diferencia de potencial eléctrico 369
Difracción de una onda 272
Difracción del sonido 299
Dispersión de la luz 316
Distancia recorrida
 en el gráfico $v-t$ 66
 en un movimiento 41
Doppler efecto 297, 298
Dualidad onda-partícula 305

E

Ecuación de los espejos esféricos 332
Ecuación de una onda 265
Efecto Doppler 297, 298
Eje óptico
 de un espejo plano 324
Elasticidad de un medio 289
Eléctrica
 energía 200
Electromagnetismo 14
Electrones 346
Electroscopio 354
Elementos eléctricos pasivos 372
Energía
 calórica 199
 cinética 198
 conversión de la 201
 eléctrica 199
 eólica 200
 ley de conservación de la 201
 nuclear 200
 potencial 199
 química 200
 radiante 200
Energía cinética 198, 202
Energía cinética traslacional 202
Energía potencial 199, 204
 gravitacional 205
Energía potencial eléctrica 368
Energía química 205
Energía radiante 306
Equilibrio
 estable 188
 inestable 189
 neutro o indiferente 190

Equilibrio estático 180
Equilibrio mecánico
 condiciones de 182
Equilibrio rotacional 181
Equilibrio traslacional 181
Escalaes
 vs vectores 38
Espectro electromagnético 306
Espectro visible de luz 306
Espejismos 315
Espejo
 cóncavo 324
 convexo 324
Espejo convergente 325
Espejo divergente 325
Espejos esféricos
 ecuación de los 332
Espejos planos 319
Estabilidad 190
Estabilidad de un objeto
 condiciones de 191
Estados de equilibrio 188
Estampida sónica 298
Estructura atómica de la materia 346

F

Factor de magnificación 321
Factor de amplificación 321
Fenómenos físicos 2
Física Clásica 12
Física Moderna. 12
Foco
 de un espejo esférico 325
Fotones 305
Frecuencia de batidos 295
Frecuencia de resonancia 299
Frecuencia del sonido 280
Frente de onda 270
Fricción 127
 coeficiente dinámico de 129
 coeficiente estático de 129
 dinámica 128
Fuente de ondas 254–263
Fuentes de energía 372
Fuerza 107
 de reacción 135
 definición de 106
 eléctrica 107
 gravedad 107

medición de la 140
normal 107
significado de 105
Fuerza balanceadas 113
Fuerza de fricción 127
Fuerza de gravedad 141, 142
vs aceleración de gravedad 141
Fuerzas
componentes 171
composición de 171
con ángulo con la horizontal 173
con distintos puntos de aplicación y misma dirección 172
con punto común y direcciones opuestas 172
con punto común y misma dirección 171
de fricción 106
descomposición de 171
líneas de 363
Fuerzas no balanceadas 113

G

Galileo
experimento de planos inclinados 108 109
Gráfico de distancia vs tiempo 55
en el movimiento rectilíneo uniforme 57
Gráfico de v vs t
en el movimiento rectilíneo uniforme 65
Gráficos
en el movimiento uniformemente acelerado 83
Gráficos para el movimiento rectilíneo
uniformemente retardado 84
Gravedad
aceleración de 91
fuerza de 91

H

Hipermetría 344

I

Imagen real 326
Imagen virtual 319, 326
Impacto social de la ciencia 8
Índice de refracción 312
Índices de refracción
tabla de 312
Inducción electrostática 353
Inercia
definición de 111, 112
Inercia, masa y peso 113

Instrumentos ópticos 341
Intensidad de corriente eléctrica 370
Intensidad del campo eléctrico 362
Intensidad del sonido 282
Interacciones 134
Interferencia constructiva 273
Interferencia destructiva 274
Interferencia de ondas 273
Intervalos musicales 281, 282
Inversión derecha-izquierda
en un espejo plano 321

J

Joule
como unidad fundamental de trabajo 197

K

Kilogramo 17–20

L

Lanzamiento vertical
hacia abajo 98
hacia arriba 100
Lente biconcava 337
Lente divergente 337
Lentes
formación de imágenes en las 338
Lentes convergentes 337
Lentes esféricas 336
Ley de Conservación de la carga 351
Ley de Coulomb 355
Ley de la Gravitación Universal 142
Ley de la reflexión 310
Ley de Ohm 371
Ley de Snell 312
Líneas de fuerza 363
Longitud de una onda 258
Longitud focal 325
Lupa 341
Luz 308
ángulo de incidencia 310
naturaleza de la 303
rapidez de la 308
rayos de 308
teorías corpuscular y ondulatoria 304

M

Magnitudes físicas 15
Masa
centro de 148, 149

medición de la 140
Masa del electrón 347
Masa del neutrón 347
Masa del protón 347
Masa vs peso 115
Masa vs volumen 115
Mecánica
 energía 200
Medida
 definición de, 15
Método científico 6, 7
Metro 16, 17
 definición del 15
 definiciones cronológicas 16–20
Microondas 307
Microscopio 341
Miopía 344
Modelos 2, 3
Momento de torsión 165, 166
 fórmula del 167
 negativo 168
 positivo 167
Movimiento
 acelerado 70
 definición del, 23
 relatividad del 25
 relativo 24
 retardado 70
 uniformemente acelerado 75
Movimiento ondulatorio 13
Múltiplo y submúltiplos
 del metro 21
 del kilogramo 21
 del segundo 21

N

Neutrón
 masa del 347
Neutrones 346
Newton
 como unidad de fuerza 108
 definición como unidad de fuerza 123
 ley de la Gravitación Universal de 144
 primera ley de 111
 segunda ley de 120, 122
 tercera ley de 136
Nodos 275
Notas consonantes 281
Notas disonantes 281

Núcleo atómico 346
Número Mach 298

O

Objetos iluminados 309
Objetos luminosos 309
Ohm
 ley de 371
Oído humano 291
Ojo humano 343
Onda 270
 ángulo de incidencia de una 270
 ángulo de reflexión de una 270
 ángulo de refracción 271
 característica de una 256
 compresión y expansión de una 255
 definición de 251
 difracción de una 272
 frecuencia de una 261, 262
 frente de 270
 longitud de una 258
 período de una 261
 pico de una 258
 pulso de 254
 rapidez de propagación de una 264
 rayo incidente 270
 rayo reflejado 270
 valle de una 258
Onda de choque 298
Onda longitudinal 255
Onda sinusoidal 257
Onda transversal 254–263, 255
Ondas 273
 antinodos en una 275
 infrarrojas 307
 interferencia constructiva 273
 nodos en una 275
 ultravioleta 307
Ondas de superficie 256
Ondas estacionarias 274, 275
Ondas mecánicas 256
Ondas viajeras 274
Óptica 13

P

Par de fuerzas 181
Patrones de medida
 características de los 16
Pendiente del gráfico $x - t$

en el movimiento rectilíneo uniforme 57
Permitividad eléctrica 356
Pico de una onda 258
Potencia del sonido 282
Potencial
energía 200, 204
Primera ley de Newton 111
Prisma 315
Protón
carga de un 351
Protones 346
Pulso de onda 254
Pulso incidente 269
Pulso reflejado 269
características del 270

R

Radio de curvatura
de un espejo plano 324
Rapidez
conversión de unidades de 29
definición de 25
unidades de 25
Rapidez del sonido 289
Rapidez instantánea
definición 26
Rapidez media
definición 27
Rapidez uniforme 28
Rayo focal 326
Rayo paralelo
en un espejo plano 325
Rayos de luz 308
Rayos gamma 307
Rayos X 307
Reflexión
ley de la 310
Reflexión de una onda 269
Reflexión difusa de la luz 309
Reflexión especular de la luz 309
Refracción
ángulo de 311
Refracción de la luz 311
fenómenos visuales asociados a la 314
Refracción del sonido 299
Representación vectorial 39
Resistencias en paralelo 374
Resistencias en serie 372, 373
Resistividad 371

Reverberación 299

S

Segunda ley de Newton 120
y el peso de un cuerpo 124, 125
Segundo 17
definición del 18
Sistema Internacional de Medidas 15, 17, 19
Snell
ley de 312
Sonido
eco en una onda de 298
frecuencia de resonancia 299
frecuencia natural 299
frecuencias infrasónicas 277
frecuencias ultrasónicas 277
intensidad de algunas fuentes de 285
intensidad del 282
interferencia constructiva 293
interferencia destructiva 293
nodos y antinodos 301
notas consonantes 281
potencia de una onda de 282
rapidez en función de la temperatura 290
refracción del 299
timbre de un 288
Superposición de ondas 273

T

Teoría científica 8
Tercera ley de Newton 136
Tiempo máximo
en caída libre 100
Timbre de un sonido 288, 289
Tono del sonido 280
Torsión
momento de 165, 166
Trabajo
definición 195
Trayectoria
en un movimiento 41

U

Unidades derivadas 19
Unidades físicas básicas 19

V

Valle de una onda 258
Vector

-
- desplazamiento 42
 - dirección de un 40
 - módulo o magnitud de un 40
 - unitario 41
 - Vectores
 - definición 38
 - representación de 39
 - vs escalares 38
 - Velocidad
 - concepto de 37
 - constante 45
 - media, definición de 42
 - uniforme 45
 - Velocidad supersónica 298
 - Virtual
 - imagen 319
 - Visión
 - proceso de la 343
 - Volcamiento 192
 - Voltio
 - unidad fundamental de potencial eléctrico 369